

# **MEMOIRE DE FIN D'ETUDES**

**Présenté pour l'obtention du Diplôme de Master 2 en Agronomie et Agro-  
Alimentaire**

**Spécialité : Conception et Evaluation des Systèmes de Production Agricole  
(CESPA)**

**Paramétrisation et Calibration du modèle SARRA-H en vue de l'étude  
des impacts climatiques sur le rendement des céréales.**



**Par : Ibrahim Mahamadou Ango**

**Année de soutenance : 2012**

**Mémoire préparé sous la direction du :  
Professeur JACQUES WERY**

**Organisme d'accueil : UMR TETIS  
Maître de stage : Christian Baron**

**Présenté le : 28/09/2012**

**devant le jury :**

**Professeur ALAIN CAPILLON : Président**

**FRANÇOIS AFFHOLDER Chercheur au CIRAD : Rapporteur**

**Professeur JACQUES WERY : Tuteur**

**CHRISTIAN BARON Chercheur au CIRAD : Maître de stage**

## RESUME

Les travaux effectués lors du stage peuvent se définir en deux objectifs : i) l'étude des effets d'un transect altitudinal sur la croissance et le développement des variétés locales de sorgho au Kenya ainsi que leur caractérisation, ii) l'analyse des pratiques de semis, culture du mil dans la région de Niamey confrontées à la diversité des situations, climat, variétés et sol, afin de spécifier des stratégies de semis des paysans. Dans ces deux cas les travaux ont permis d'améliorer le paramétrage et d'estimer la capacité prédictives du modèle de culture SARRA-H sur des essais en milieu contrôlés et ou des enquêtes en milieu paysan. Ce modèle étant utilisé dans le cadre d'étude des impacts climatiques sur le rendement des céréales.

A partir des données d'essais agronomiques du projet PIVREVAT en milieu contrôlé, implantées sur deux sites au Kenya le long d'un gradient altitudinal (Kiboko, 950m d'altitude et Weru, 1160 m d'altitude), nous avons analysé les spécificités de 5 variétés locales de sorgho en vue d'améliorer les paramètres du modèle SARRA-H sur ces variétés et de vérifier la robustesse de la relation de répartition de biomasse utilisée dans le modèle. Les résultats mettent en évidence : (i) que les variétés étudiées ont deux types très différents de réponse à la date de semis et que les durées de cycle varient d'un site à l'autre ; (ii) le modèle rend en particulier assez bien compte les phases et cycles de développement de ces variétés paysannes pendant les périodes de semis ; (iii) la relation allométrique entre le ratio « biomasse feuille / biomasse aérienne » en fonction de biomasse aérienne est la même pour les variétés du même groupe.

A partir des données d'enquêtes et de suivis menés en milieu paysan sur la culture du mil, pour 7 années consécutives (2004 à 2010) et des enregistrements pluviométriques journaliers sur le degré carré de Niamey, une analyse de la performance du modèle et de sa capacité à reproduire les dates de semis et re-semis observées en milieu paysan a été réalisée. Les résultats montrent que (i) les performances du modèle SARRA-H pour simuler les dates de semis et re-semis sont acceptables au vue de la complexité de la relation entre la date de début de la saison des pluies et les stratégies de semis en milieu paysan ; (ii) le modèle SARRA-H simule assez correctement la variabilité interannuelle des dates de semis, mais il simule passablement la variabilité dans l'espace lorsque le début de la saison des pluies est précoce

**MOTS-CLÉS** : Date de semis et re-semis, Mil, Relation Allométrique, SARRA-H, Sorgho

## **ABSTRACT**

Work aims to define two problematic: i) document the specificities of five local's Sorghum varieties on Eastern slope of Mount Kenya and analyse the effect of altitudinal transect on their development, ii) analyse the pearl Millet sowing practices in the area of Niamey in Niger versus the environmental variability and constraint (climate, crop varieties and soil) to specify farmer's sowing strategies. Those two studies allow optimising the use and parameterisation of the SARRA-H crop model and specifying his predictive capacity using trials and farmer's survey data. The SARRA-H model is mainly use in the context of the impact of climate variability and change on cereals yield prediction in prospective studies and for food security (early warning system).

Using trials data over two sites along the Eastern slope of Mount Kenya, Kiboko at 950 m and Weru at 1160 m (PICREVAT, project), we have documented the specificities of five local's Sorghum varieties aim optimizing the parameterisation of SARRA-H crop model and also verifying the robustness of allometric repartition concept implemented in the software. Results show: (i) varieties have two types of process governing their development when changing date of sowing and as expected the length of cycle vary from site to site; (ii) the simulations of phase's duration over the common sowing periods are acceptable; (iii) the allometric relationship is robust between varieties group but unluckily not along the altitudinal transect.

Using farmer's survey data on pearl millet cropping system, during seven consecutive years (from 2004 to 2010) and rainfall data over the scare degree of Niamey, we analyse the predictive capacity of SARRA-H model simulating sowing date and failure sowing. Results show: (i) the predictive capacity is satisfactory face on the complexity of farmer's strategies mitigating the variability of the onset rainy season; (i) the SARRA-H model simulate accurately the inter-annual variability of sowing date but less satisfying for the spatial variability in case of very early rainy season.

**KEYWORDS:** Allometric relationship, Millet, Sorghum, Sowing and re-sowing date

## REMERCIEMENTS

Le travail dont il est fait état dans ce document a été réalisé au Cirad Montpellier en France à l'UMR TETIS. Au terme de ce travail :

Je prie Monsieur le **Professeur Alain Capillon** de trouver ici toute ma gratitude et ma reconnaissance pour avoir accepté malgré ses lourdes tâches de présider le jury qui évaluerait ce document. J'adresse également mes remerciements à Monsieur **François Affholder** de sa disponibilité pour rapporter ce travail malgré un emploi du temps chargé.

Je tiens à remercier Monsieur le **Professeur Jacques Wery**, mon tuteur d'école, qui dès le départ, a tenu à attirer mon attention sur la particularité de mon sujet; ses conseils, ses indications, ses critiques et ses suggestions ont beaucoup aidé dans la réalisation de ce mémoire.

Monsieur **Christian Baron**, qui a eu la lourde responsabilité de superviser ce travail et qui en dépit de son emploi du temps chargé, l'a fait avec conscience, rigueur et efficacité. Je tiens à le remercier pour sa disponibilité permanente et ses critiques constructives si nécessaires à la finalisation du texte.

Ma profonde gratitude va à l'endroit de **Michel Vaksman, Jacques Chantereau, Aurélie Metay, Benoît Clerget, Myriam Adam, Philippe Oriol, Agali Alhassane, Joseph Boyard-Micheau** pour leurs encouragements, leurs soutiens et leurs conseils avisés.

Mes remerciements iront ensuite à l'endroit du corps professoral de PVD-CESPA qui a guidé mes pas dans la recherche agronomique.

Merci aux collègues stagiaires de la maison de la télédétection et tous ceux qui de près ou de loin ont contribué à la réalisation de ce travail.

**Isabelle Bastie** par sa disponibilité et sa gentillesse, m'a aidé dans tout ce qui est administratif et pour cela, un seul mot : Merci.

Grand merci à mes **frères et sœurs**, les **PVD-CESPA 2011-2012** qui m'ont porté dans leurs cœurs et qui ont récréé un cadre familial pour Moi à Montpellier. Sachez que l'eau chaude n'oubliera jamais qu'elle a été froide. **Proverbe Africain**

Je ne finirai pas sans remercier le gouvernement Français à travers l'ambassade de France au Niger qui a pris la charge de mes études. Merci pour tout !

Je n'oublie pas bien évidemment mes parents et mes frères et sœurs pour leur soutien constant.



## SOMMAIRE

RESUME.....	3
REMERCIEMENTS .....	4
SOMMAIRE .....	5
SIGLES ET ABREVIATIONS .....	7
LISTE DES FIGURES.....	9
INTRODUCTION GENERALE.....	11
Chapitre 1 Contexte et Problématique .....	13
1.1 Contexte.....	13
1.2 Problématique.....	14
1.3 Hypothèses d'étude.....	15
1.4 Démarche et plan du mémoire.....	15
1.4.1 Calibration du modèle .....	15
1.4.2 Utilisation du modèle pour les questions agronomiques.....	16
Chapitre 2 Caractérisation de la phénologie des variétés locales de sorgho et paramétrisation du modèle .....	17
2.1 Introduction .....	17
2.2 Problématique et démarche .....	17
2.3 Matériel et méthode .....	18
2.3.1 Matériels et mesures.....	18
2.3.2 Le modèle SARRA-H .....	18
2.3.3 Analyses des données.....	19
2.3.4 Paramétrage et calibrage de la phénologie des variétés .....	19
2.3.5 Durées des stades phénologiques en temps thermique.....	20
2.3.6 Paramètres de sensibilité au photopériodisme .....	20
2.3.7 Evaluation du modèle.....	20
2.4 Résultats et Discussion .....	21
2.4.1 Caractérisation des variétés.....	21
2.4.2 Analyse de la dynamique d'apparition des feuilles.....	22
2.4.3 Analyse de la sensibilité photopériodique.....	23
2.4.4 Calibrage de SARRA-H .....	24
2.5 Conclusion .....	25
Chapitre 3 Robustesse de la méthode de répartition de biomasse .....	26
3.1 Introduction .....	26
3.2 Problématique et démarche .....	26
3.3 Matériel et méthode .....	26
3.3.1 Mesure de biomasse .....	27
3.3.2 Méthode.....	27
3.4 Résultats et Discussion .....	27
3.5 Conclusions .....	29

Chapitre 4	Mortalité juvénile des plants et gestion des semis .....	30
4.1	Introduction .....	30
4.2	Problématique et démarche .....	30
4.3	Matériels et Méthode .....	31
4.3.1	Matériels.....	31
4.3.2	Méthode.....	31
4.4	Résultats et Discussions.....	33
4.4.1	Seuil eau semis .....	33
4.4.2	Relation entre la date de semis réussis simulée versus semis réussis observée .	33
4.4.3	Evaluation de la performance du modèle .....	33
4.5	Conclusion .....	34
CONCLUSION ET PERSPECTIVES .....		35
1	Rappel des objectifs .....	35
2	Synthèse des résultats .....	35
3.	Perspectives de recherches .....	36
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....		37
ANNEXE .....		43

## **SIGLES ET ABREVIATIONS**

**AGRHYMET** : Centre Régional de formation et d'applications en Agrométéorologie et Hydrologie opérationnelles

**Aéro TotPente** : Pente de la relation de répartition BiomAérienne-BiomTotale

**AMMA** : Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine

**BVP** : Basic Vegetative Period (phase phénologique allant de la levée à l'IP)

**CATCH** : Couplage de l'Atmosphère Tropicale et du Cycle Hydrologique

**CIRAD** : Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement

**CSTR** : Constante de Stress (ou Indice de contrainte hydrique du sol)

**DHC** : Diagnostic Hydrique des Cultures, modèle de simulation du bilan hydrique

**EPSAT** : Estimation des Précipitations par SATellite

**ETo** : Evapotranspiration de référence

**GCM** : Modèle de Circulation Générale

**Hmax** : Humidité maximum

**Hmin** : Humidité minimum

**HAPEX**: Hydrological and Atmospheric Pilot EXperiment

**HKP** : Hainy Kirey Précoce (mil rouge)

**ICRISAT**: International Crop Research Institute for Semi-Arid Tropics

**Ins** : Insolation

**IP** Initiation paniculaire

**Kp** : Coefficient de photosensibilité

**Matu1** : Phase de maturité allant de la floraison à la maturité cireuse

**Matu2** : Phase de maturité allant de la maturité cireuse à la maturité totale

**PICREVAT** : Prévisibilité de l'Information Climatique pour la REduction de la Vulnérabilité de l'Agriculture Tropicale

**PenteSLA** : Pente de la Surface massique des feuilles

**PPcrit** : Photopériode critique

**PPexp** : Atténuateur progressif de la réponse à la photopériode

**PPsens** : Variable définissant sensibilité à la photopériode d'une variété

**PSP** : Phase photosensible

**Rg** : Rayonnement global

**RMSE**: Root Mean Square Error

**RPR** : Reproductive period (phase allant de l'initiation paniculaire à la floraison)

**SARRA-H**: Système d'Analyse Régionale des Risques Agroclimatiques (H = habillé), modèle de simulation de la croissance des cultures

**SeuilPP** : Photopériode seuil

**SLAmax** : Specific Leaf Area (surface massique des feuilles maximum)

**SLAmin** : Specific Leaf Area (surface massique des feuilles minimum)

**Tbase** : Température de base (Température minimale permettant la germination et la croissance de la culture)

**Tlim** : Température limite

**Tmax** : Température maximale

**T<sub>min</sub>** : Température minimale

**T<sub>opt1</sub>** : Premier palier de température optimale

**T<sub>opt2</sub>** : Deuxième palier de température optimale

**UMR TETIS** : Unité Mixte de Recherche Territoire Environnement Télédétection et  
Information Spatiale

**W<sub>s</sub>** : Vitesse du vent de surface



## LISTE DES FIGURES

**Figure 1** : Schéma d'amélioration du modèle SARRA en SARRA-H

**Figure 2** : découpage du cycle de développement dans SARRA-H

**Figure 3** : Variation de la durée du jour à Kiboko et à Weru

**Figure 4** : Variation des durées semis-feuille drapeau des variétés paysannes (en haut en nombre de jour après semis et en bas en degré jour) en relation à la date de semis

**Figure 5** : Comparaison des durées semis feuille drapeau des deux groupes de variété

**Figure 6** : variation du nombre de feuille total initié à la feuille drapeau des variétés paysannes

**Figure 7**: Cinétique d'apparition des feuilles des variétés

**Figure 8** : Variation du coefficient de photosensibilité des variétés en fonction de la date de semis

**Figure 9.a** : Variation de la durée levée-IP du sorgho au Kenya et les variations de la durée du jour et de l'heure du lever du soleil en fonction de la date d'IP estimée.

**Figure 9.b** : Variation de la durée levée-IP du sorgho au Kenya et les variations de la durée du jour et de l'heure du coucher du soleil en fonction de la date d'IP estimée.

**Figure 10**: relations entre la biomasse feuille et la biomasse aérienne des variétés étudiées pendant les deux saisons campagnes 2010 et 2011

**Figure 11** : relation allométrique par groupe de variété

**Figure 12** : Relation entre les biomasses (Kg/ha) feuilles, tiges et aériennes simulées et les biomasses (Kg/ha) feuilles, tiges et aériennes observées à gauche Kiboko et à droite Weru.

**Figure 13** : Carte d'Afrique de l'Ouest et localisation des 30 pluviographes au sein de l'observatoire méso-échelle AMMA-CATCH Niger. Les cercles noirs indiquent les 10 villages enquêtés et documentés par des données agronomiques durant les hivernages 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009 et 2010.

**Figure 14** : Résultats de l'optimisation pour la détermination du seuil d'eau minimum pour les semis automatiques

**Figure 15** : Relation entre les dates de semis réussis simulées et les dates de semis réussis observées

## LISTE DES TABLEAUX

**Tableau 1** : Paramètres gérant la phénologie et le photopériodisme utilisés dans le calibrage du modèle SARRA-H V3.2. Avec : \* = coefficient ajustés, \*\* = coefficient calculés

**Tableau 2** : Valeur du phyllochrone moyen des variétés étudiées pour l'ensemble des dates de semis au niveau des deux sites

**Tableau 3** : Dates de floraison simulées et observées et les déviations

**Tableau 5** : Tableau de contingence dates de semis observées vs dates de semis simulées par SARRA-H

**Tableau 6** : Tableau de contingence dates de semis observées vs dates de semis précoces simulées par SARRA-H

**Tableau 7** : Tableau de contingence dates de semis observées vs dates de semis intermédiaires simulées par SARRA-H

**Tableau 8:** Tableau de contingence dates de semis observées vs dates de semis tardives simulées par SARRA-H

**Tableau 9 :** Scores de performance du modèle SARRA-H

## INTRODUCTION GENERALE

Les régions de l'Afrique occidentale et orientale « Drylands » subissent régulièrement des crises alimentaires du fait de la grande fragilité des systèmes agricoles pluviaux à faibles ressources. Ces systèmes constituent le réseau très dense des « agricultures familiales » qui sont le mode de production largement dominant en Afrique Caron 2005. Les agricultures familiales, en particulier lorsqu'elles sont pratiquées dans des zones où les éléments du climat sont extrêmes et les sols fragiles Franquin P 1981, sont particulièrement vulnérables. Cette fragilité expose, les populations rurales à des impacts de la variabilité et des changements climatiques sur la production agricole, qui est considéré comme le secteur le plus tributaire des conditions météorologiques de toutes les activités humaines Oram 1989 ; Hansen 2002.

Etudier l'impact du climat sur l'agriculture passe par l'utilisation de modèles agronomiques, en complément des analyses de terrain. Les modèles permettent de simuler les effets, combinés ou non, de la phénologie des organes végétatifs et reproductifs Fenner 1998, Lawless et al. 2005, de la nutrition azotée Lemaire and Gastal 1997, Limami et Améziame 1997, Olesen et al. 2002, des stress thermique Porter and Gawith 1999 et hydrique Jones and Tardieu 1998, Debaeke and Aboudrare 2004. La tendance est à la mise au point de modèles qui prennent en compte les pratiques agricoles Boote et al. 1996, Brisson et al. 2003.

Pour améliorer la sécurité alimentaire et la capacité d'adaptation de ces agriculteurs vis-à-vis de la variabilité interannuelle et décennale des précipitations et d'en mitiger les effets dans ces zones, le Cirad (UMR TETIS) avec ses Partenaires l'AGRHYMET (Niger) et l'ICRISAT (Kenya) dans le cadre du projet PICREVAT (Prévisibilité de l'Information Climatique pour la REduction de la Vulnérabilité de l'Agriculture Tropicale) tentent d'étudier les impacts climatiques sur le rendement des céréales. Le projet s'articule autour d'une approche pluridisciplinaire dont l'un des objectifs est de définir, tester et évaluer une méthodologie intégrée afin de combler le manque entre les prévisions climatiques saisonnières, disponibles un (1) à trois (3) mois avant la saison des pluies à l'échelle régionale et l'information pluviométrique à l'échelle intra-saisonnière et locale.

Les recherches du projet PICREVAT couvrent des aires tropicales et subtropicales (Cameroun, Argentine, Tanzanie, Kenya et Niger) associées à un ou plusieurs types de culture (Mil, Sorgho, Riz, Coton) selon les conditions du milieu. Ce sont les cultures de Sorgho et de Mil qui seront étudiées respectivement au Kenya plus précisément sur le versant Est du Mont Kenya et au Niger sur la zone du degré carré de Niamey. L'objectif de notre travail sera d'étudier d'une part les effets du transect altitudinal sur la croissance et le développement des variétés locales de sorgho au Kenya et d'autre part appréhender les périodes favorables au semis au regard de la diversité des situations (climat vs plantes vs sol) et des pratiques de gestion des semis des paysans au Niger afin d'améliorer les paramètres du modèle de culture SARRA-H pour les prévisions agricoles de la parcelle cultivée à la région.

Le premier chapitre présente le contexte, la problématique et les hypothèses d'étude. Dans le deuxième chapitre sont reportés les résultats concernant la caractérisation des variétés locales de sorgho et le paramétrage du modèle. Le troisième chapitre traite de la robustesse de la méthode de répartition de biomasse utilisée dans SARRA-H au Kenya. Le quatrième chapitre s'intéresse à la question des dates de semis et re-semis dont le rôle dans le système de production de ces régions est très important pour faire face aux caprices du climat. Enfin la synthèse des informations présentées, permet d'établir une conclusion et des perspectives.

## Chapitre 1 Contexte et Problématique

### 1.1 Contexte

La population d'Afrique est dans sa grande majorité dépendante des milieux qu'elles occupent [Ker 1995](#). L'agriculture est le plus souvent pratiquée dans un cadre familial et à des fins essentiellement vivrières, avec peu à pas d'intrants (irrigation, mécanisation, engrais chimiques, produits phytosanitaires, ...) et donc fortement dépendante des conditions climatiques [Black \*et al.\* 2003](#) ; [Pohl et Camberlin 2006](#), [Mishra 2008](#).

Au sein des zones d'étude, le sorgho est, avec le mil, la nourriture de base. La production principale de ces denrées alimentaires est assurée pendant la saison des pluies et c'est d'elle qu'il sera question dans ce travail.

Au cours de la dernière décennie, la production de céréales alimentaires a augmenté régulièrement, tandis que les rendements restent faibles et stables, par exemple elle est d'environ 500 kg/ha en zone sahélienne et de 1 tonne /ha en zone soudanienne [Clerget 2004](#). L'augmentation de production est donc assurée par l'extension des surfaces, et elle permet de compenser plus ou moins l'évolution de la demande entraînée par la forte croissance démographique, en dehors des périodes de crise climatique.

Dans ces régions, caractérisées par un climat de type tropical, une meilleure compréhension des interactions entre les variations climatiques d'une année à l'autre et les stratégies adoptées par les agriculteurs (choix des variétés et de la date de semis) afin d'atténuer les risques climatiques est un enjeu important aujourd'hui pour la production agricole et la sécurité alimentaire future.

La littérature internationale est riche en références utilisables dans ce type de contexte [Cooper et al. 1987](#) ; [Gerik et Freebairn 2004](#). Les manuels d'aridoculture ou 'dry farming' abordent les questions relatives aux choix des cultures en fonction du niveau de remplissage de la réserve en eau du sol au semis, périodes optimales de semis... [Dregne et Willis 1983](#).

Dans ces conditions où la ressource en eau est très limitée, pour assurer la résilience des systèmes agricoles traditionnels, les agriculteurs africains en général, et ceux des pentes orientales du Mont Kenya et du Niger, autoproduisent leurs semences par sélection à partir de leur propre récolte. Cependant, cette stratégie est toujours affectée par la variabilité du climat, à l'instar des épisodes de sécheresses importantes (en particulier ceux qui se produisent sur deux saisons consécutives) entraînant des pertes importantes. Plus généralement, les effets des variations climatiques d'année en année sont censés affecter fortement les rendements des cultures de subsistance, et, par conséquent, la sécurité alimentaire.

Aujourd'hui, les enjeux de ce que l'on désigne par la sécurité alimentaire et le développement durable rendent nécessaire d'établir dans ces régions des systèmes de suivi et d'alerte précoce efficaces et des diagnostics de l'utilisation des ressources hydrique et végétale à des échelles régionale et/ou saisonnières.



La modélisation est l'un des outils privilégiés pour appréhender ces problèmes complexes posés par la conduite des agroécosystèmes [Malézieux et al. 2001](#). Cependant, les systèmes de suivi des campagnes agricoles et d'alertes précoces objets complexes, imposent aux chercheurs d'appréhender la dynamique des agroécosystèmes et le respect de leur complexité intrinsèque. Cette « obligation méthodologique » [Legay 1999](#) pose cependant problème lorsque l'on entreprend des analyses avec des modèles conçus pour être utilisés à l'échelle parcellaire [Vossen and Rikjs 1998](#). En plus, le principal souci avec les modèles est l'existence d'un grand nombre de paramètres par exemple 132 dans STICS [Ruget et al. 2002](#), [Brisson et al. 2003](#). Ceci, a conduit au développement des modèles de culture simplifiés dont SARRA-H (Système d'Analyse Régionale des Risques Agroclimatiques, version H).

SARRA-H est un modèle de simulation des rendements des cultures annuelles (mil, sorgho, maïs, etc.), qui intègre un bilan carboné et hydrique, la phénologie et le photopériodisme de la plante [Sultan 2002](#). Ce modèle reproduit assez fidèlement le développement de la plante dans les conditions optimales de culture [Dingkuhn et al. 2003](#) et à terme il devrait remplacer un modèle DHC, utilisé par l'*AGRHYMET en Afrique de l'Ouest*, qui permet de suivre le déroulement de l'hivernage [Forest 1984](#) ; [Ganzin 1989](#) et de fournir des informations en matière de sécurité alimentaire en cours de saison. Ce modèle DHC (Diagnostic Hydrique des Cultures) développé aussi par le Cirad, est principalement basé sur un bilan hydrique, et n'a été calibré que pour le rendement du mil (*Pennisetum glaucum* [L.] R.Br.), et ceci uniquement dans la bande sahélienne. Le modèle SARRA-H a été paramétré et évalué pour les conditions et pratiques culturales rencontrées en milieu paysan pour plusieurs variétés locales de Mil et Sorgho dans la zone sahélienne [Alhassane 2009](#). Dernièrement des évolutions et améliorations ont été apportées permettant le suivi sur deux saisons consécutives (cas du Kenya) et de prévoir les dates de semis en fonction des plantes et pratiques de semis.

## 1.2 Problématique

En Afrique, les conditions météorologiques avec la fertilité des sols, apparaissent comme les principaux facteurs limitant de la production céréalière en raison de leur forte variabilité. Des études menées dans des pays différents (e.g Burkina-Faso) [Ingram et al. 2002](#), ont permis d'identifier en collaboration avec les agriculteurs, les informations les plus cruciales dans le choix des stratégies agricoles.

En réponse au constat d'échec de l'amélioration de la productivité des céréales en Afrique, les équipes de recherche actuelles ont pris le parti de repartir de la diversité des variétés locales et régionale afin d'utiliser ses qualités d'adaptation intrinsèque. Ces équipes multidisciplinaires travaillent en association et le processus engagé couvre notamment la collecte des écotypes, leur caractérisation et l'étude de la relation entre la date de début de saison des pluies et les stratégies de semis en milieu paysan. Autour du thème de la sécurité alimentaire, rapporté à l'impact de la variabilité climatique sur les rendements des céréales, la problématique motrice est de paramétrer, et évaluer les modèles de culture sur les stratégies des paysans qui utilisent ces variétés locales pour assurer l'autosuffisance alimentaire, dans des contextes différents.

Dans ce contexte plusieurs questions ont été soulevées :

- 1) Comment les variétés locales de sorgho réagissent-elles face aux contraintes climatiques dans un contexte de gradient altitudinal ?
- 2) La méthode de répartition des biomasses basée sur une relation simple et empirique (relation allométrique de répartition des biomasses) choisie pour sa robustesse et vérifiée en Afrique de l'Ouest reste-t-elle robuste dans les conditions Kenyane (variation de la température en fonction de l'altitude) ?
- 3) Le modèle SARRA-H est-il capable de reproduire les dates de semis et re-semis observées en milieu paysan ?

Pour des raisons d'opérationnalité nous avons abordé ces questions en gardant à l'esprit la nécessité de ne pas trop compliquer les choses en ce qui concerne le modèle utilisé et les informations et paramètres nécessaires.

### 1.3 Hypothèses d'étude

Les processus de bases de développement et de croissance des plantes sont considérées identiques sous toutes les latitudes et longitudes, qu'il s'agisse de conditions climatiques ou de conditions édaphiques. Ainsi, selon la loi du facteur limitant, on ne peut tirer le meilleur parti du sol ni des cultivars sans tirer le meilleur parti du climat. Et vice versa.

Vu l'éventail assez large, nous proposons l'hypothèse selon laquelle **la sélection effectuée par les agriculteurs et les pratiques culturelles rencontrées en milieu paysan sont des réponses d'adaptation à la variabilité des contraintes et aux risques liés aux impacts climatiques dans un environnement économique très contraint**. C'est donc dans cette optique que ce travail s'insère en cherchant à mieux documenter les spécificités des variétés locales au regard des pratiques agricoles et contraintes climatiques.

### 1.4 Démarche et plan du mémoire

Les données utilisées dans le cadre de ce travail proviennent de deux projets différents PIVREVAT au Kenya et AMMA-CATCH Niger. Les données d'essais agronomiques (projet PIVREVAT) en milieu contrôlé implantées au Kenya sur deux sites le long d'un gradient altitudinal [Kiboko (altitude 950m, latitude 2 ° 12 'S et longitude 37 ° 42' E) et Weru (altitude 1160 m, latitude 0 ° 21 'S et longitude 37 ° 42' E)] ont été récupérées, traitées et analysées. Les mesures provenant de deux protocoles (semis mensuels et, mesure de biomasse et de rendement) expérimentaux différents ont essentiellement porté sur cinq variétés locales de sorgho choisies pour représenter le plus largement possible la diversité présente dans la zone d'étude.

#### 1.4.1 Calibration du modèle

Les mesures de phénologie et de la croissance de ces variétés (sorgho) enregistrées à des pas de temps réguliers en fonction de la date de semis ont permis de déterminer les longueurs des phases et cycles en calculant les durées moyennes entre semis et feuille drapeau.

La variation de la date de semis modifie les conditions climatiques et permet de mieux caractériser les variétés et d'étudier les caractères d'adaptation à l'environnement reconnu comme primordial par les agriculteurs (photopériodisme). En s'appuyant sur la spécificité de ces variétés, les valeurs des paramètres gérant la phénologie, ont été déterminées et le modèle SARRA-H a été paramétré, calibré et évalué. Les mesures au pas de temps journalier (2009-2011), des paramètres météorologiques entrant dans le calcul de l'évapotranspiration de référence (ET0) (température minimale et maximale, humidité relative minimale et maximale, rayonnement global, vitesse du vent) et pluie, ont permis de déterminer en degrés jour selon la formule [Baron et Dingkuhn 2003](#) les durées des phases phénologiques et du cycle des variétés puis les scénarii de simulations sont construits. A partir des données recueillies des mesures de biomasse et de rendement, et des interprétations proposées pour définir les relations entre le quotient biomasse feuille/biomasse aérienne et biomasse aérienne, la robustesse de la relation allométrique a été vérifiée. Les données d'enquêtes et de suivis en milieu paysan (AMMA-CATCH Niger) préalablement traitées et analysées par les partenaires de l'AGRHYMET ont permis de regrouper les dates de semis et re-semis en vague de semis lorsque ces dates sont très proches (moins de 10 jours). La date de semis est alors rapportée à la première date, qui, en général correspond à l'occurrence d'une pluie la veille ou le jour même. Ainsi, des scénarii de simulation regroupant les parcelles d'un village ayant une même date ou vague de semis et une même variété sont obtenus et spécifiés au modèle pour les simulations : par village et par année on peut avoir un à quatre ou plus de scénarii de simulations fonction du nombre de variétés et re-semis.

#### **1.4.2 Utilisation du modèle pour les questions agronomiques**

Dans ces pays, les pratiques agricoles sont dictées par le début, la fin de la saison des pluies et la distribution des pluies. Pour répondre à une situation d'insécurité alimentaire complexe due à la variabilité climatique et une démographie galopante, l'une des solutions est d'anticiper les effets de la variabilité climatique sur les rendements des céréales pluviales. Le modèle SARRA-H est utilisé dans ce cadre pour répondre à la diversité des situations limitant les rendements des cultures et élargir les prévisions à d'autres céréales et zones agro écologiques. En s'appuyant sur le modèle SARRA-H calibré, on pourra choisir des variétés adaptées au début et la fin de saison des pluies (cycle, sensibilité à la photopériode), choisir les dates de semis (semer au bon moment) pour que les cultures valorisent l'eau disponible afin de mieux adapter le calendrier cultural des agriculteurs et réduire les pertes de semences et des capitaux en minimisant les impacts climatiques sur la production.



## **Chapitre 2 Caractérisation de la phénologie des variétés locales de sorgho et paramétrisation du modèle**

### **2.1 Introduction**

Le terme « phénologie » communément utilisé se réfère au développement des plantes à travers des stades identifiables Summerfield et al. 1991. L'étude de la phénologie est donc l'étude des différentes phases de développement de plantes ou d'animaux au cours de leurs cycles de vie Rathcke 1985 ; Lebourgeois et Godfroy 2005. Elle renseigne sur la répartition dans le temps des phénomènes périodiques caractéristiques du cycle de vie des organismes. Le déroulement de ce cycle dépend essentiellement du génotype et traduit un programme préétabli, qui fixe la durée des différentes phases en fonction des conditions du milieu (température, photopériode...) Sie 1997. Tous les auteurs s'accordent sur le fait que le développement d'une culture est d'abord affecté par la température Dingkuhn et Miézan 1992, et peut être modifié par d'autres facteurs comme la photopériode Vaksman et al. 1996.

### **2.2 Problématique et démarche**

Dans une approche de modélisation, il est fondamental de bien caractériser les phases de développement qui gouvernent les processus intervenant dans la croissance et le développement des plantes. L'horloge interne des plantes étant différente du temps calendaire, les modèles s'appuient sur la notion de somme de température évaluée en degrés-jour Durand et al. 1982 cités par Bonhomme, 1992 et sur la notion de durée de jour pour définir le photopériodisme qui est un trait de caractère variétal et qui s'observe couramment sur les plantes tropicales locales Thomas et Vince-Prue 1997. Dans ce contexte de variation climatique le long d'un gradient altitudinal (Mont Kenya), l'objectif de ce premier chapitre est de chercher à caractériser les traits de développement de plusieurs variétés locales de sorghos obtenues en milieu paysan. Plus spécifiquement, l'étude qui est présentée ici a pour objectifs de déterminer à partir des données d'une expérience de semis mensuels :

- ✓ les sommes de degrés-jours qui pilotent les développements phénologiques des variétés, c'est-à-dire qui sont nécessaires et caractéristiques des différentes phases des cycles,
- ✓ le caractère photopériodique de certaines variétés, et ses caractéristiques (sensibilité, déclenchement), qui est un caractère d'adaptation à la variabilité interannuelle des longueurs des saisons des pluies.

### **L'approche de prise en compte de l'effet du photopériodisme dans le modèle SARRA-H permet- elle de répondre à la variabilité des situations rencontrées ?**

Cette étude s'est donc basée d'abord sur un effort important d'analyse et de traitement des données issues d'essais agronomiques. Ces données sont utilisées pour calculer les durées moyennes des phases. La durée des phases est déterminée par les caractéristiques génétiques variétales.

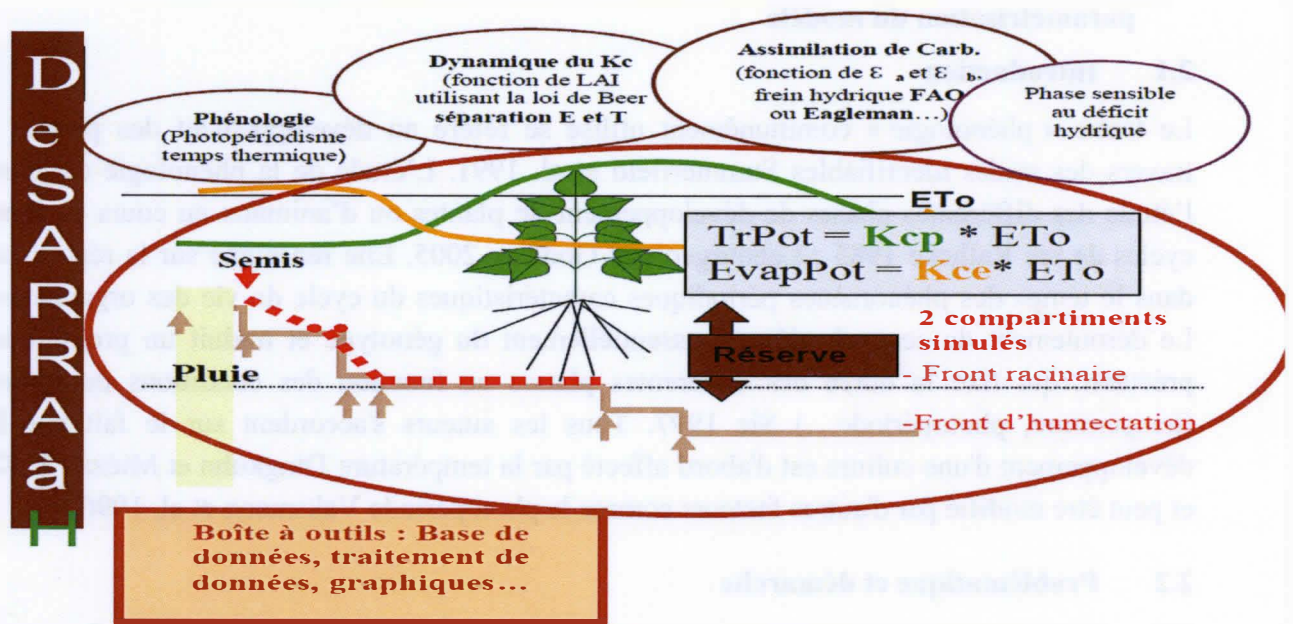


Figure 1 : Schéma d'amélioration du modèle SARRA en SARRA-H *Baron et Dingkuhn, 2003*

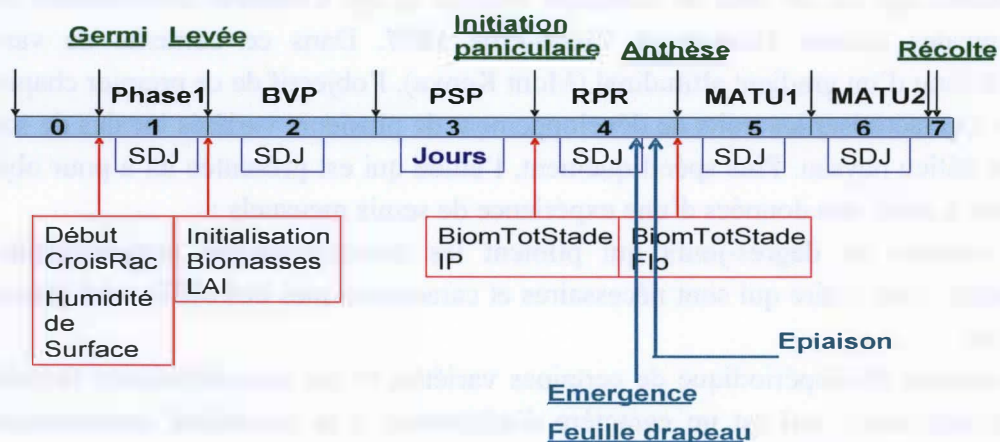


Figure 2 : découpage du cycle de développement dans SARRA-H (les longueurs des phases sont à titre indicatif).

**Phase 1** : Phase germination levée

**BVP** : Basic Vegetative Period (phase phénologique allant de la levée à l'IP)

**PSP** : Phase photosensible

**RPR** : Reproductive period (phase allant de l'initiation paniculaire à la floraison)

**Matu1** : Phase de maturité allant de la floraison à la maturité cireuse

**Matu2** : Phase de maturité allant de la maturité cireuse à la maturité totale

**SDJ** : Somme des degrés jour

**IP** Initiation paniculaire



Pour le Mil et le Sorgho les durées des phases Initiation paniculaire - floraison et floraison - maturation sont considérées comme invariantes quelles que soient les variétés. La caractérisation variétale des durées de phases phénologiques a pu être définies à partir de la durée semis feuille drapeau qui a été déterminée pour toutes les variétés. D'autre part, l'information provenant de ces essais sur le nombre des feuilles a permis de déterminer le phyllochrone et sa variabilité en fonction des contraintes environnementales pour pouvoir déduire leur impact sur les processus de croissance. Enfin, les données provenant des stations météorologiques placées sur chaque site, à proximité des essais, ont permis de confronter les observations au modèle de calcul des degrés jour et selon les variétés de caractériser la sensibilité à la photopériode permettant de paramétrer le modèle. Le caractère photopériodique a été mis en évidence par l'analyse des durées des phases en fonction des différentes dates de semis et la détermination du coefficient de photosensibilité.

## **2.3 Matériel et méthode**

### **2.3.1 Matériels et mesures**

Le matériel végétal étudié est le sorgho qui est une plante céréalière dont le cycle de développement est très variable selon la variété. Pour tenir compte de cette diversité des cycles variétaux 5 variétés locales de sorgho sont choisies au Kenya (Ciagakirwe, Gadam, Kathirigwa, Mugana et Mugeta). La plupart des observations et mesures ont été effectuées sur un calendrier établi du semis à la feuille drapeau de chaque variété. Pour la phénologie, les dates de semis, de germination, le nombre de feuilles initiées du semis à la feuille drapeau et la date d'apparition de la feuille drapeau sont relevées pour l'essai de semis effectué à un intervalle d'un mois pour un total de 24 mois pour la caractérisation de la phénologie, où on compte (1 à 2 fois par semaine) le nombre de feuilles apparus jusqu'à l'apparition de la feuille drapeau, lorsque la feuille drapeau est observée, le nombre de feuilles total est compté et la date de l'apparition de la feuille drapeau est enregistrée sur la tige de la plante. Pour les données climatiques les observations effectuées étaient dictées par les besoins en information du modèle (pluies, température, insolation, humidité relative et vitesse du vent). Ces données sont utilisées après vérification de leur cohérence pour déterminer les durées des phases et du cycle de chaque variété.

### **2.3.2 Le modèle SARRA-H**

La version 3.2 de SARRA-H (Figure : 1) simule les rendements réalisables à l'échelle de la parcelle en condition d'eau limitée, en simulant les conditions de l'équilibre hydrique du sol, l'évaporation et la transpiration potentielle et réelle, la phénologie, l'assimilation du carbone et le partitionnement de la biomasse [Baron et al. 1996](#), [Kouressy et al. 2008](#) ; [Alhassane 2009](#). La phénologie dans le modèle SARRA-H (Figure : 2) est basée sur des phases simplifiées: phase germination-levée, phase végétative de base (BVP), phase photosensible (PSP), phase de reproduction (RPR) et phase de maturation et dessiccation (Matu1 et Matu2). La durée des phases est définie par des constantes génétiques en somme de degrés-jours, où seule la phase photosensible est variable et dépend de la longueur du jour [Dingkuhn et al. 2008](#). La méthode des degrés jours est basée sur 4 paramètres prenant en compte l'écart entre les températures minimum et maximum de la journée.

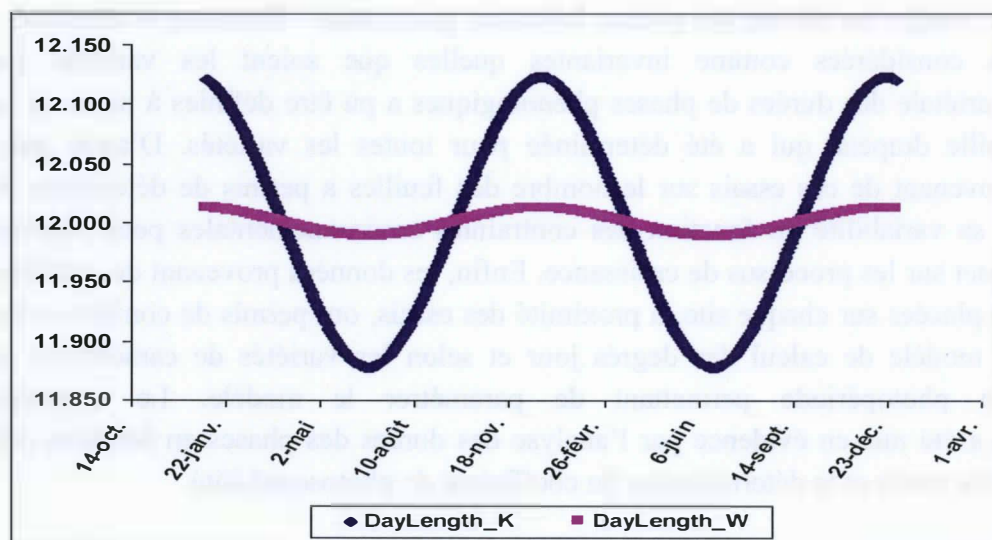


Figure 3 : Variation de la durée du jour à Kiboko (courbe blue) et à Weru (courbe rose)

**Tableau 1** : Paramètres gérant la phénologie et le photopériodisme utilisés dans le calibrage du modèle SARRA-H V3.2. Avec : \* = coefficient ajustés, \*\* = coefficient calculés

Paramètres de calibrage de SARRA-H	Sigles	Unités	Singles	Ratoons
Cumul thermique Levée**	SDJLevée	°C jour-1	70	70
Cumul thermique BVP**	SDJBVP	°C jour-1	310	530
Cumul thermique Initiation paniculaire-Floraison (RPR)*	SDJRPR	°C jour-1	465	465
Cumul thermique Floraison-Maturité Cireuse (Matu1)*	SDJMatu1	°C jour-1	285	285
Cumul thermique Maturité cireuse-Maturité totale (Matu2)*	SDJMatu2	°C jour-1	165	165
Température de base*	Tbase	°C	11	11
Température Optimale1	Topt1	°C	28	28
Température Optimale2	Topt2	°C	36	36
Température limite	Tlim	°C	44	44
Température de Référence de Respiration de Maintenance	TxrespMain	°C	25	25
Coefficient d'atténuation à la sensibilité à la photopériode**	PPexp		0,1	
Coefficient sensibilité à la photopériode**	PPsens		1	
Seuil horaire ou la floraison est immédiate**	PPcrit	Heure	11,5	11,5
photopériode seuil **	SeuilPP	Heure	12,5	12,5

**Ratoons** : Variété locale de sorgho à panicules lâches dont la durée du cycle est fonction de la date de semis dans l'année

**Singles** : Variété locale de sorgho à panicules compactes dont la durée du cycle est quasiment la même quelque soit la date de semis dans l'année

**NB** : le coefficient de sensibilité à la photopériode et le coefficient d'atténuation à la sensibilité à la photopériode pour les Ratoons ne sont pas déterminés à cause de la variation de la durée du cycle de ces variétés entre Kiboko et Weru



Le modèle gère les températures optimales par paliers (avec  $T_{opt1} = 28\text{ °C}$ ,  $T_{opt2} = 36\text{ °C}$  et température limite ( $T_{lim}$ ) =  $44\text{ °C}$  pour le sorgho) tout en prenant soin d'écarter les valeurs thermiques supérieures à  $T_{lim}$ , du fait qu'elles ne sont pas favorables au développement de la plante mais pas de prise en compte du stress thermique qui réduirait la vitesse du processus de développement. Le module de prise en compte de la réaction à la photopériode suit le concept de réponse à la photopériode décrit par Dingkuhn et al. 2008. La phase végétative est prolongée avec la sensibilité à la photopériode de la variété. La phase photosensible, est calculée sous l'hypothèse d'une photopériode seuil  $SeuilPP(h)$ , qui est la limite supérieure de la longueur du jour (Figure : 3) pour la réponse à la photopériode d'une variété et d'une photopériode critique  $PP_{crit}(h)$ , en dessous de laquelle l'initiation paniculaire (IP) est déclenchée immédiatement après la fin de la phase de développement végétatif de base (BVP). Deux autres coefficients sont ajoutés aux deux précédents. Le premier  $PP_{sens}$  variable importante définissant la sensibilité à la photopériode d'une variété, il est compris entre 0 et 1 (de 0,3 à 0,6 pour une variété sensible à la photopériode) et le deuxième  $PP_{exp}$ , qui est un atténuateur progressif de la réponse à la photopériode (varie entre 0 et 1).

### 2.3.3 Analyses des données

**La première étape** a consisté à analyser la variabilité du climat le long du transect altitudinal (Mont Kenya) afin de voir comment évoluent les principales variables, qui pilotent la croissance et le développement du sorgho le long du gradient altitudinal. Puis, en une série d'analyses pour vérifier l'intégrité des données. Des contrôles de validité des données ont été effectués pour cerner le manque de cohérence des données à l'intérieur de chaque essai et les dates d'apparition de la feuille drapeau atypique. Ces contrôles et corrections ont été effectués surtout à travers l'avis d'experts (erreurs de mesures, de saisie, prise en compte des événements constatés de visu, etc....).

**La deuxième étape** a consisté en des analyses descriptives de chaque essai. Ces statistiques descriptives avaient pour but de décrire les données en termes de tendance centrale et de dispersion.

**La troisième étape** a consisté quant à elle en une comparaison de l'information de chaque site et entre les variétés lorsque la taille de l'échantillon le permettait. Les analyses comparatives, ou les analyses des différences des groupes, ont nécessité l'analyse des différences statistiques. Une gamme d'analyses a servi à déterminer si de véritables différences existaient entre certains groupes cibles au sein du même site. Par exemple, le test Z de l'écart réduit et le test t de Student) pour comparer les durées moyennes semis feuille entre les variétés d'un même groupe d'une année à l'autre et d'un site à l'autre.

**La dernière étape** a consisté à savoir s'il y avait une relation entre les variables significatives relatives à nos questions.

### 2.3.4 Paramétrage et calibrage de la phénologie des variétés

Le paramétrage et le calibrage du modèle SARRA-H ont été effectués sur sa version 3.2. Au cours de l'opération, certaines valeurs paramétriques du modèle n'ont pas été modifiées. Par contre, d'autres ont été soit ajustées dans les limites des intervalles de variation définis pour le sorgho, soient calculées à partir des données expérimentales tableau 1.

### 2.3.5 Durées des stades phénologiques en temps thermique

Nous avons fixé le seuil de température ( $T_{base}$ ) à la limite duquel la germination et le développement de la plante sont possibles à 11 °C pour le sorgho Ndiaye 1997 ; Van Oosterom et al. 2002. Pour procéder au paramétrage nous avons choisi, sur la base de la littérature Dinkhun et al. 2008 et Traoré et al. 2010 et dans le souci d'aboutir à une simplification des paramétrages, de considérer des valeurs communes pour toutes les variétés de sommes de degrés-jour pour RPR, Matu1 et Matu2. Selon les dires d'experts ces différentes phases ont de durées en jours de 35, 22 et 13 respectivement. Nous avons calculé les durées moyennes de chaque phase en jour pour chaque date de semis, puis cette durée est convertie en degré jour afin de déterminer une valeur moyenne en degré jour pour toutes les dates de semis. La durée thermique de la phase végétative de base (BVP) a été directement calibrée à partir des données de l'expérience de semis mensuels.

**Sommes de degrés-jours phase BVP variétés à cycle constant :** pour calculer la BVP des variétés non photopériodique, nous avons d'abord déterminé la durée moyenne semis feuille drapeau de toutes les dates de semis puis calculé la BVP moyenne en soustrayant de la durée moyenne semis feuille drapeau les durées semis-levée et IP-feuille drapeau.

**Sommes de degrés-jours phase BVP variétés photopériodiques :** pour définir la BVP à partir des dates de feuilles drapeau pour les variétés photopériodiques, la méthode utilisée est simple, nous observons les durées semis feuille drapeau au cours de plusieurs cycles pour chaque saison et chaque variété, semée à des dates de semis différentes, avec parmi eux un cycle à une date de semis extrêmement tardive de façon à annihiler pour ce cycle toute expression du photopériodisme si elle existe. Pour simplifier, la durée levée-IP est par conséquent minimale et ne dépend que des températures.

**Sommes de degrés-jours phase germination et levée :** la durée de la phase germination-levée est déterminée sur la base des observations de terrain qui montrent en fonction de l'humidité du sol des levées entre 4 et 6 jours après semis. Nous avons calculé la durée moyenne (en nombre de jour et degré jour) sur les 24 dates de semis.

### 2.3.6 Paramètres de sensibilité au photopériodisme

La limite supérieure de la longueur du jour pour la réponse à la photopériode (SeuilPP) et la limite inférieure de la réponse de la longueur du jour (PPcrit) sont déterminées en fonction de la durée du jour le long de l'année. Pour le Kenya les valeurs 12,5 et 11,5 sont respectivement retenues pour SeuilPP, PPcrit. Le coefficient de sensibilité à la photopériode (PPsens) et celui d'atténuation de la réponse à la photopériode (PPexp) sont déterminés par comparaison des durées semis-feuille drapeau observées et simulées pour les différentes dates de semis disponibles pour chaque variété. Cette dernière étape du processus est par nature itérative et implique différentes simulations permettant d'optimiser la corrélation entre valeurs simulées et observées.

### 2.3.7 Evaluation du modèle

Pour l'évaluation statistique, du modèle SARRA-H, nous avons calculé des scores de performances et la Root Mean Square Error (RMSE), qui est une mesure de l'erreur du modèle, exprimée dans les mêmes unités que la variable analysée.



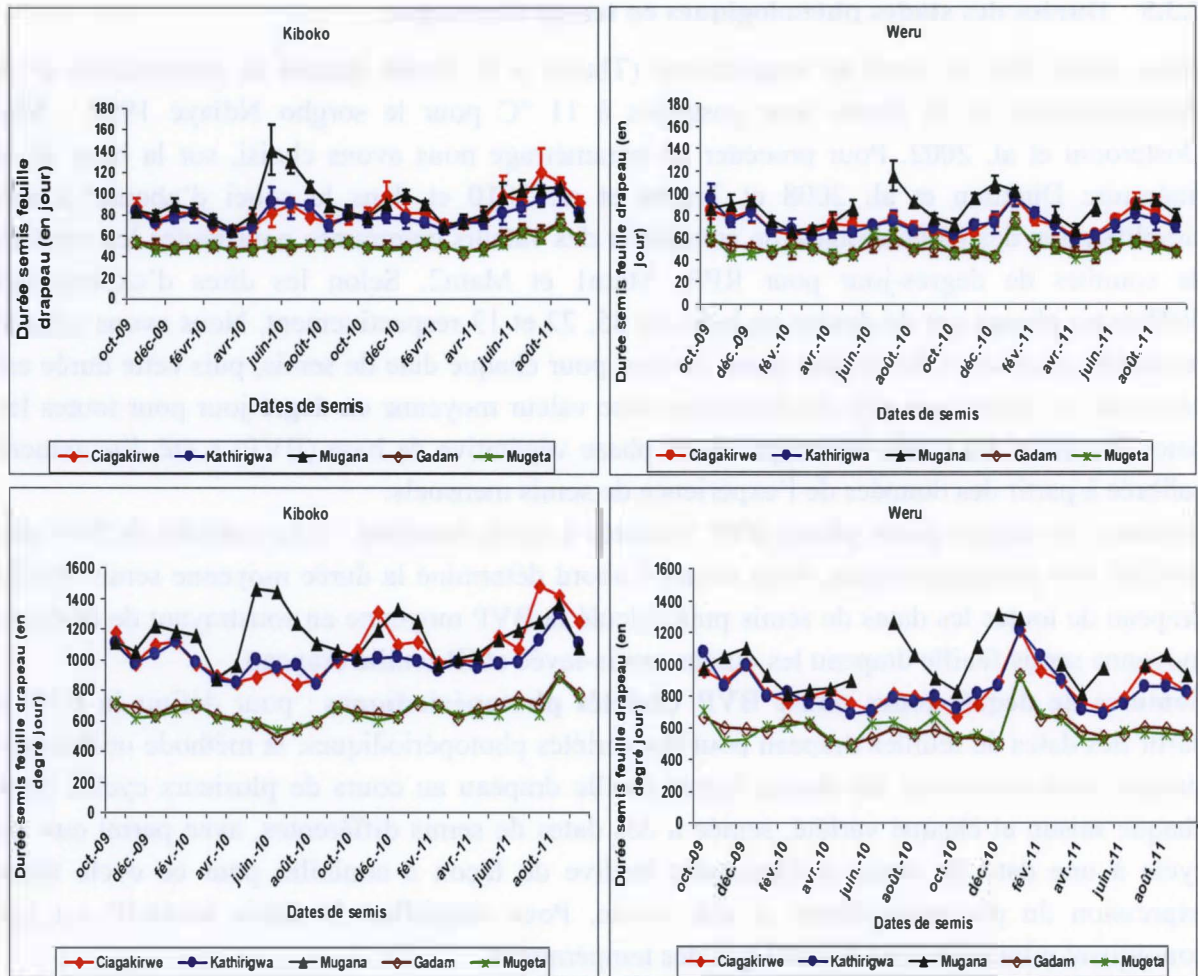


Figure 4 : Variation des durées semis-feuille drapeau des variétés paysannes (en haut en nombre de jour après semis et en bas en degré jour) en relation à la date de semis : à gauche Sorgho à Kiboko et à droite Sorgho à Weru.

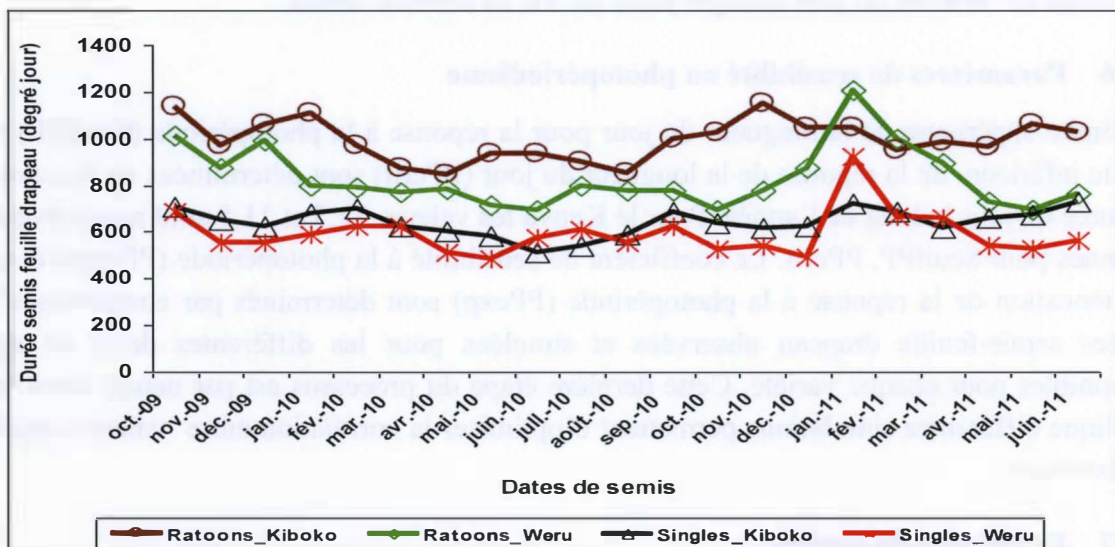


Figure 5 : Comparaison des durées semis feuille drapeau des deux groupes de variété (Singles et Ratoons) entre Kiboko et Weru.



## 2.4 Résultats et Discussion

### 2.4.1 Caractérisation des variétés

Les résultats font ressortir deux groupes variétaux (Figure : 4) au niveau des deux sites : le premier « Singles » dont la durée semis-feuille drapeau est quasiment constante (Gadam et Mugeta) et le deuxième « Ratoons » (Ciagakirwe, Kathirigwa et Mugana) à cycle long est variable en fonction de la date de semis. Par comparaison des durées semis-feuille drapeau des différents groupes variétaux entre Kiboko et Weru (Figure : 5), l'analyse statistique (test de comparaison de moyenne) montre que les variétés semblent avoir des cycles plus courts à Weru qu'à Kiboko. Cette différence de durée semis feuille drapeau peut être due à l'effet de la latitude quand on s'éloigne de l'équateur. Ce présupposé fut discuté par Curtis 1968, qui a observé au Nigéria une stabilité des dates de floraison (par conséquent celle de la date d'apparition de la feuille drapeau) des sorghos semés entre 7 et 11°N, mais les conclusions de Curtis sont en opposition aux observations de Doré 1959 sur le riz en Malaisie à 2 et 6°N, qui a remarqué une variation des dates de floraison. Vaksmann et al. 2012 (à paraître) ont obtenus les mêmes résultats que Doré au Mali sur du sorgho.

Nos résultats corroborent ceux de Doré 1959 et Vaksmann et al. 2012 mais aussi, ceux de Clerget et al. 2008, obtenus sur 5 variétés de mil et 2 variétés de sorgho. Il est en effet communément admis au Mali et au Burkina Faso que pour une même date de semis, lorsque l'on déplace une variété vers le nord (si on s'éloigne de l'équateur), la durée du cycle se rallonge. Cela provient des photopériodes plus longues vers le nord (entre avril et juillet) qui allongent la durée du cycle. Inversement le cycle se raccourcit lorsque l'on descend vers le sud. Au Kenya, on obtient la même chose mais dans le sens inverse. La durée du cycle se raccourcit en se rapprochant de l'équateur vers le nord. Vaksmann, Chantereau, (Communications Personnelles).

L'inversion des températures observée (annexe 1), peut toutefois retarder l'apparition de la feuille drapeau et expliquer cette différence. Les résultats de l'analyse de la variation du climat le long du transect altitudinal (annexe 1) montrent que les variations saisonnières sont importantes, en dépit de l'emplacement proche de l'équateur. Les plus hautes températures maximales s'observent peu de temps avant le début de la saison des pluies début Octobre pour la courte saison et début Mars pour la longue saison aux deux endroits Camberlain P et al. 2011. Les températures maximales diminuent au cours des saisons humides et une baisse de température maximale se produit pendant la saison sèche à des altitudes élevées, en raison de l'inversion de température à faible niveau de couverture qui se développe sur les hauts plateaux du Kenya à cette époque de l'année Okoola 1990, 2000. Donc les différences observées peuvent être due à ces variations de température qui font varier la durée des phases et du cycle dans cet intervalle de temps.

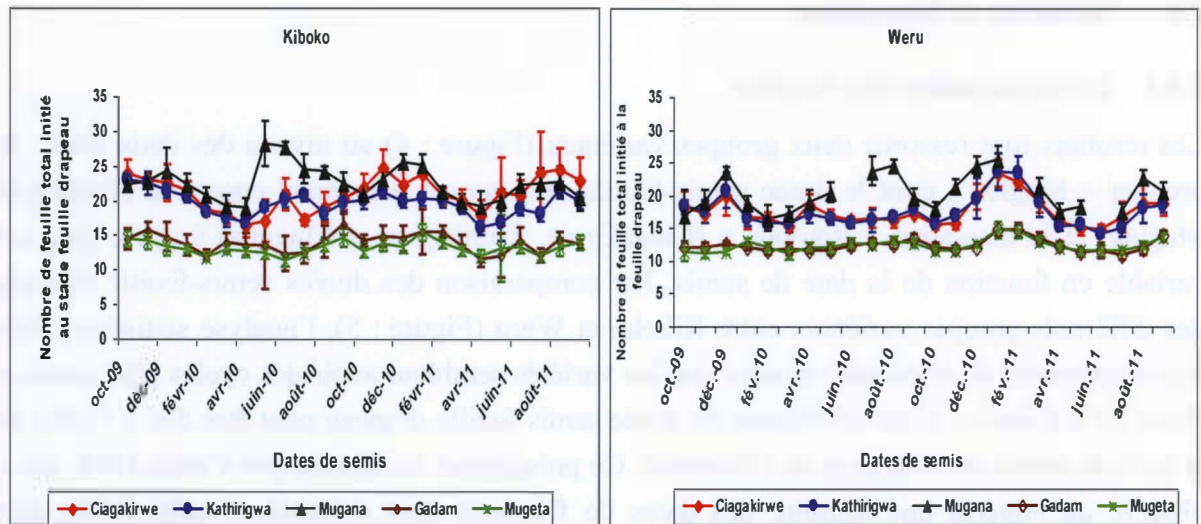


Figure 6 : variation du nombre de feuille total initié à la feuille drapeau des variétés paysannes à gauche à Kiboko et à droite à Weru.

Mais le fait que l'inversion des températures soit ponctuelle (sur une période bien déterminée) alors que la différence des durées de cycle est observée sur quasiment toute la durée de l'expérimentation, nous laisse penser l'existence d'autres facteurs environnementaux explicatifs. On peut penser à la fraîcheur des nuits car les températures nocturnes plus fraîches peuvent provoquer une augmentation de la durée thermique de la phase semis-feuille drapeau. Ainsi l'effet des températures journalières ne peut pas à lui seul expliquer la différence observée entre les sites. Cependant, en changeant la température de base ( $T_{base}$ ), on obtient des très bons résultats avec 10 et 11 °C respectivement à Weru et Kiboko, ce qui nous laisse penser à un problème de thermomètre (a-t-on le même type de thermomètre au niveau des sites ?). En plus les températures nocturnes qui ne sont pas prise en compte par le modèle et surtout si elles sont inférieures à la température de base ont eu très certainement des effets sur ce décalage. Clerget 2004, est arrivé aux mêmes conclusions sur des sorghos au Mali. En plus dans cette étude nos analyses étaient uniquement basées sur les températures de l'air (à 2 mètre du sol), mais très certainement les températures à quelques centimètres du sol qui ne sont jamais prises en compte sont différentes au moins pendant les périodes sèches car dans ces zones l'évaporation est tellement forte qu'elle peut impacter la température du sol et par conséquent entrainer un retard dans la croissance Clerget (**Communication Personnelle**).

Par ailleurs, si l'on admet les résultats obtenus par Sahrawat et al. 1995 sur la réponse du sorgho à la fertilité des sols, qui peut modifier la date de floraison et donc celle d'apparition de la feuille drapeau du fait qu'une carence surtout en Phosphore, en particulier, est connue pour influencer la phénologie du sorgho, mais l'effet serait faible, sauf dans le cas d'un grave déficit qui est capable de retarder fortement la floraison. A cela on peut associer les problèmes phytosanitaires rencontrés surtout à Weru avant la floraison de sorte que les différences de précocité peuvent être attribuées à un problème de santé végétale.

En plus, un manque ou un excès d'eau peut retarder la floraison et affecter par conséquent l'apparition de la feuille drapeau. Ainsi, à un certain degré de sécheresse, tous les aspects physiologiques de la plante peuvent être influencés et le moindre déficit en eau entraînera la sénescence des feuilles Maracchi et al. 1992 et le ralentissement de la croissance Cantini 1995. Nous estimons ainsi, que la variation observée est due probablement à un stress malgré l'irrigation d'appoint. Les résultats obtenus au 2.4.3 confirment cette hypothèse, mais nous estimons que cela est insuffisant pour expliquer cette différence.

#### **2.4.2 Analyse de la dynamique d'apparition des feuilles**

Le nombre total de feuilles produites a varié entre un minimum de 12 et un maximum de 16 pour les variétés à cycle constant à Kiboko et 11 et 15 à Weru et entre un minimum de 14 et 16 et un maximum de 25 pour les variétés à cycle long respectivement à Weru et Kiboko.

Ce nombre total de feuilles (Figure : 6). initiées à la feuille drapeau confirme bien ce qu'annoncé auparavant concernant les deux groupes de variété et la différence de durée de



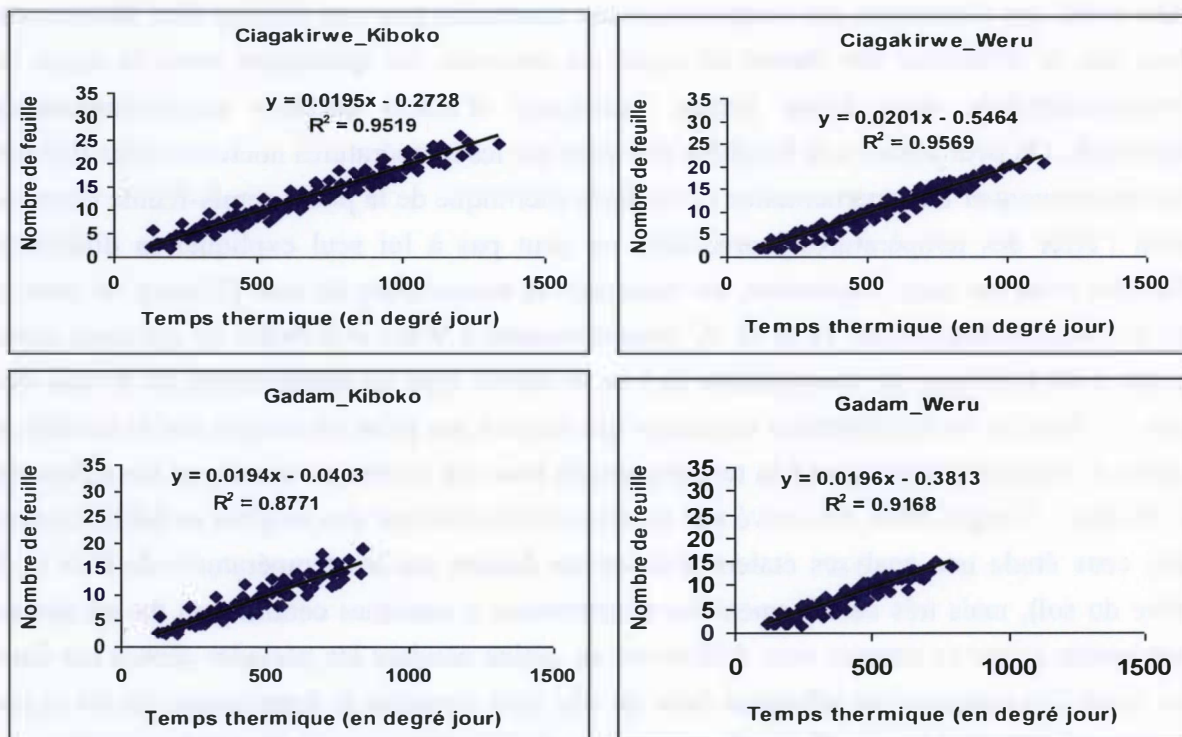


Figure 7: Cinétique d'apparition des feuilles des variétés à gauche Kiboko et à droite Weru.

Tableau 2 : Valeur du phyllochrone moyen des variétés étudiées pour l'ensemble des dates de semis au niveau des deux sites

Variété	Phyllochrone à Kiboko ( degré jour)	Phyllochrone à Weru (degré jour)
Ciagakirwe	51	50
Kathirigwa	53	48
Mugana	53	50
Gadam	52	48
Mugeta	58	53

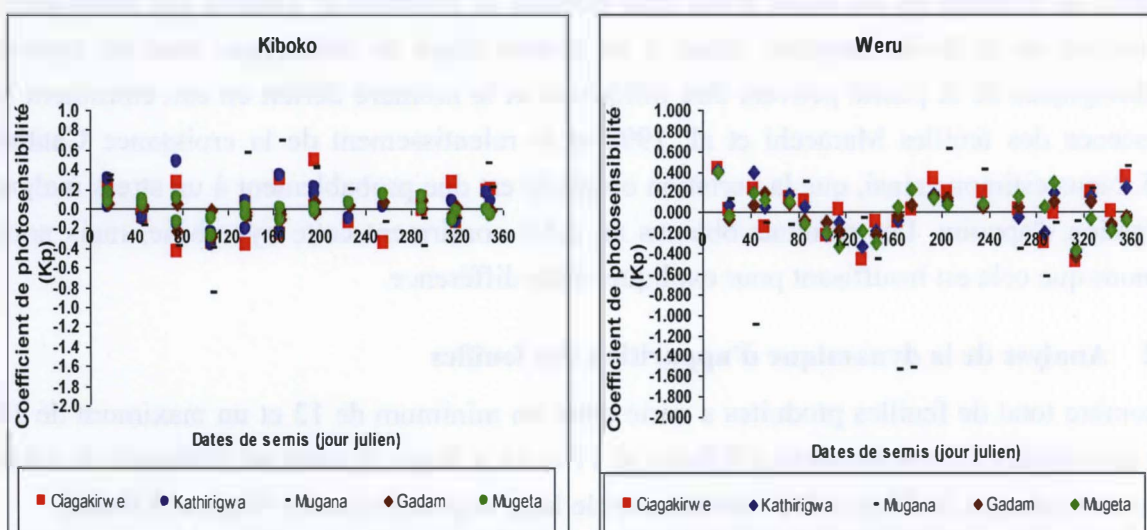


Figure 8 : Variation du coefficient de photosensibilité des variétés en fonction de la date de semis à gauche Kiboko et à droite Weru.

cycle entre les deux sites. Ces résultats laissent penser qu'à Kiboko, les variétés mettent plus de temps (degré jour) pour atteindre la feuille drapeau mais produisent plus de feuilles ce qui est physiologiquement normal. A Weru, elles arrivent à la feuille drapeau avec moins de degré jour et produisent moins de feuilles. Au vu de ces résultats, nous avons calculé pour chaque date de semis le phyllochrone, qui est bien connu chez les céréales en raison de la facilité de l'observation. La (figure 7) présente les régressions linéaires réalisées pour les deux groupes variétaux afin de déterminer le phyllochrone. Les résultats présentés au tableau 2 sont conformes au concept habituel de phyllochrone car il n'y a pas des grandes variations au cours du cycle, quand bien même un nombre moyen de feuilles a été produit par les deux groupes de variétés. Les valeurs moyennes des phyllochrones ont donc été quasiment identiques pour les 5 variétés, autour de 50°C.j.feuille-1 Cette valeur est proche de la valeur de 49°C.j.feuille-1 publiée par Ritchie 1998 mais éloignée de celle de 69 °C.j.feuille-1 publiée par Muchow et Carberry 1990.

### 2.4.3 Analyse de la sensibilité photopériodique

Une partie des variétés de sorgho sont dites photopériodiques parce que la durée de leur cycle semis-floraison change avec la date de semis tandis que chez les variétés non photopériodiques la durée de ce cycle reste fixe. Le cycle des variétés photopériodiques est raccourci à mesure qu'elles sont semées plus tard dans la saison des pluies. Les variétés peuvent être plus ou moins photopériodiques, c'est-à dire qu'un décalage d'un mois de la date de semis induira un raccourcissement d'un mois de la durée du cycle semis-floraison chez les variétés très photopériodiques mais seulement de quelques jours chez les variétés légèrement photopériodiques, toutes les situations intermédiaires paraissant exister. Un indice de sensibilité à la photopériode,  $K_p$ , a ainsi été défini comme le rapport entre la différence de durée des cycles semis-floraison pour 2 dates de semis distinctes et l'écart séparant ces 2 dates de semis.  $K_p$  varie donc entre 1 pour les variétés très photopériodiques et 0 pour celles qui sont non-photopériodiques. La figure 8 présente les résultats obtenus. Ces résultats montrent que le  $K_p$  des Singles est dans la majeure partie proche de zéro ce qui laisse penser qu'elles sont peu ou pas photosensibles, par contre celui des Ratoons a varié en fonction de la date de semis et on observe des  $K_p$  négatifs, ce qui laisse penser que ces variétés sont faiblement photopériodique et que la variation de durée semis-feuille drapeau est de même ordre que l'erreur expérimentale. Ces valeurs négatives peuvent être dues à un stress (sécheresse ou excès d'eau), car le second semis peut avoir du mal à fleurir et donner l'impression d'être plus tardif ce qui amène à des  $K_p$  négatifs. Enfin, comme il y eu des semis en jours croissants, au second semis la durée du jour est plus longue et donc la durée du cycle aussi et donc le  $K_p$  devient négatif.



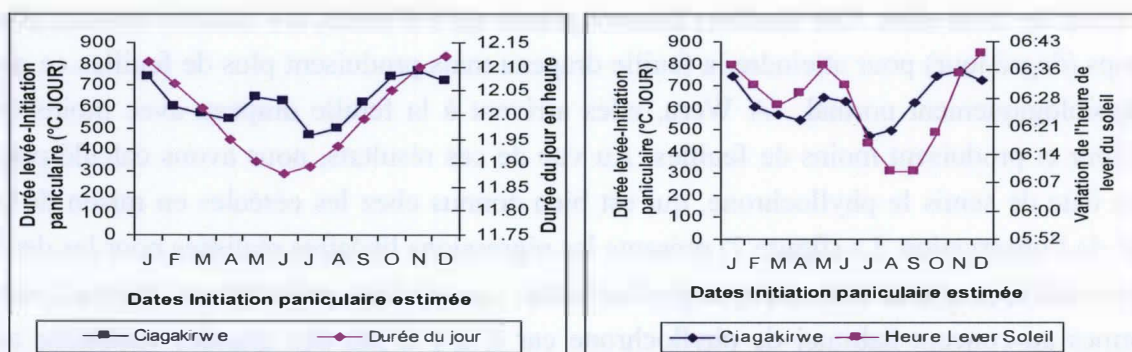


Figure 9.a : Variation de la durée levée-initiation paniculaire du sorgho au Kenya et les variations de la durée du jour et de l'heure du lever du soleil en fonction de la date d'initiation paniculaire estimée.

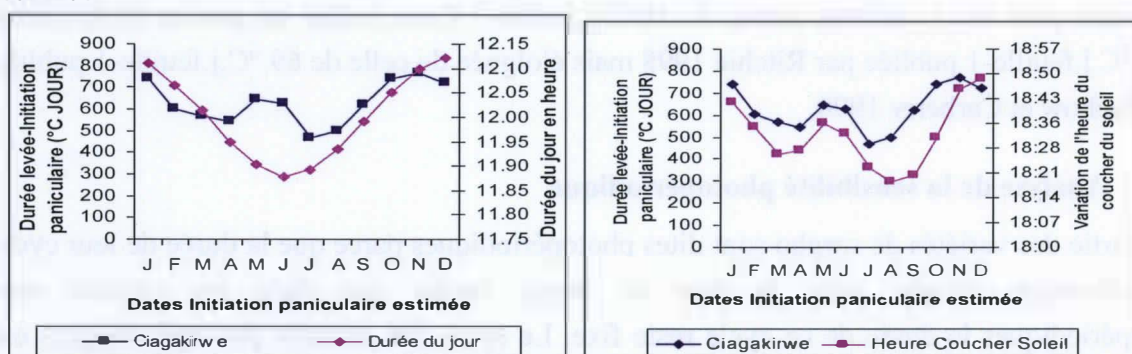


Figure 9.b : Variation de la durée levée-initiation paniculaire du sorgho au Kenya et les variations de la durée du jour et de l'heure du coucher du soleil en fonction de la date d'initiation paniculaire estimée.

Tableau 3 : Dates de floraison simulées et observées et les déviations

Variété	Dates floraison simulée	Dates floraison observée	Ecart dates Simulée Observée (en jour)
Singles	17/12/2009	17/12/2009	0
Singles	18/01/2010	15/01/2010	3
Singles	17/02/2010	11/02/2010	6
Singles	18/03/2010	16/03/2010	2
Singles	18/04/2010	16/04/2010	2
Singles	17/05/2010	10/05/2010	7
Singles	23/06/2010	12/06/2010	11
Singles	01/08/2010	15/07/2010	17
Singles	05/09/2010	13/08/2010	23
Singles	02/10/2010	16/09/2010	17
Singles	25/10/2010	16/10/2010	9
Singles	22/11/2010	19/11/2010	3
Singles	19/12/2010	13/12/2010	6
Singles	19/01/2011	13/01/2011	6
Singles	18/02/2011	11/02/2011	7
Singles	19/03/2011	19/03/2011	0
Singles	17/04/2011	16/04/2011	1
Singles	16/05/2011	08/05/2011	8
Singles	23/06/2011	15/06/2011	8
Singles	24/07/2011	22/07/2011	2
Singles	30/08/2011	30/08/2011	0

Pour les variétés photopériodiques, toutes les plantes semées entre janvier et février ont atteint la feuille drapeau dans un intervalle de un mois de début avril à fin avril. Cette apparition groupée de la feuille drapeau a été certainement précédée par des IP groupées intervenues entre début mars et fin mars, alors que la durée du jour restait encore voisine de 12h. Pour les autres dates de semis à l'inverse la durée semis-feuille drapeau a varié régulièrement d'un mois en fonction de la date de semis et des photopériodes rencontrées par les plantes pendant leur croissance. Ce qui laisse croire des réactions différentes à la photopériode en fonction de la date de semis. Plusieurs études [Clerget 2004](#) et [Borchert 2005](#) ont fait cas de la sensibilité de certaines plantes tropicales à de très faibles différences de la photopériode, de l'ordre de quelques minutes, ces mêmes auteurs pensent que ces plantes sont susceptibles de réagir aussi au décalage quotidien de l'heure du lever et du coucher du soleil. La figure 9 présente les résultats de la variation de la durée levée-IP de trois variétés de sorgho au Kenya et les variations de l'heure du lever et coucher du soleil en fonction de la date d'IP. Il ressort de ces résultats que la variation de la durée du jour est insuffisante à elle seule pour caler la phénologie du sorgho au Mont Kenya. Les résultats de l'analyse de la covariance effectuée pour analyser la variation de la durée du cycle en fonction de la variation de la durée du jour, de la variation quotidienne de l'heure, de la levée à l'IP, du site (variable qualitative prenant la valeur Kiboko ou Weru) par conséquent l'effet latitude et altitude montrent que ces trois paramètres permettent d'expliquer 60% de la variabilité de la durée du cycle. Une part importante de la variabilité de la durée du cycle reste donc inexpliquée. Ce qui montre que cette relation simple utilisée dans le modèle ne peut pas rendre compte de la réponse photopériodique lorsqu'elle est observée tout au long de l'année.

#### **2.4.4 Calibrage de SARRA-H**

Comme expliqué dans matériels et méthodes, les valeurs des paramètres phénologiques ont été calculées pour les différentes variétés ensuite des valeurs moyennes ont été définies pour les groupes des variétés. Avec ces valeurs, nous simulons assez bien les dates de floraison des Singles surtout pendant les périodes de semis des agriculteurs. Le tableau 3 présente les dates de floraison et les déviations observées à Kiboko. Ces résultats montrent que les concepts utilisés dans le modèle SARRA-H peuvent être appliqués pour les semis effectués pendant les saisons des pluies et permettent une assez bonne prédiction pour les variétés à cycle constant. Mais il apparaît tout aussi clairement que ces concepts ne sont pas adaptés à la réaction des cultures semées pendant les autres périodes de l'année pour les variétés photopériodiques (résultats non présentés dans ce document).

## 2.5 Conclusion

Le résultat majeur de cette étude est la mise en évidence d'une différence pour la durée de la phase végétative entre les singles et les ratoons et une large diversité des ratoons. Cette étude confirme, la difficulté de bien caractériser les variétés locales. Les variétés étudiées ont donc montré deux types très différents de réponse à la date de semis lorsqu'elles ont été semées pendant toute l'année. Cette variabilité du comportement est probablement engendrée par une variabilité génétique dont la connaissance reste à élucider. Par ailleurs, il a été possible de paramétrer le modèle de façon satisfaisante sur les variétés à cycle constant, et ce en s'efforçant de ne jouer que sur un nombre très réduit de paramètres pour distinguer les variétés entre elles. Le modèle rend en particulier assez bien compte les phases et cycles de développement des Singles à Kiboko. Pour les ratoons la tentative de calibrage n'a pas abouti à cause de la différence de durée de cycle observée entre les deux sites. Il est important de souligner que l'un des principaux objectifs assignés à cette première partie, qui est la caractérisation des variétés le long du gradient altitudinal du Mont Kenya est loin d'être atteint. Cependant, comme le suggèrent [Vaksmann et al. 2012 \(à paraître\)](#) la correction des paramètres en fonction de la latitude est possible, mais ne peut pas être extrapolée au-delà de la gamme de latitude exploitée par les expériences. Ceci dit, des études sont nécessaires pour tester le comportement des variétés sur un large éventail de latitudes. Comme l'ont démontré [Vaksmann et al 2012](#)) ([à paraître](#) les ajustements statistiques de certains paramètres (PPsens) avec la latitude peuvent aider à améliorer la représentation de la phénologie le long des gradients latitudinal, cependant, cela n'offre pas toutes les explications physiologiques de ce phénomène. Il serait donc nécessaire de décrypter le fondement physiologique de l'effet de latitude associé certainement à l'effet de l'altitude observé sur le Mont Kenya. Enfin, la mise en place d'un nouveau modèle phénologique, capable de prendre en compte les effets combinés de latitude et de l'altitude sera nécessaire car SARRA-H n'est pas en mesure de le faire.



## Chapitre 3 Robustesse de la méthode de répartition de biomasse

### 3.1 Introduction

La matière carbonée une fois produite par la photosynthèse dans les feuilles, est distribuée aux différents organes pour leur entretien et leur croissance. Cette répartition de la biomasse est généralement considérée en séparant d'une part ce qui est affecté aux racines, organes souterrains difficilement accessibles à l'expérimentateur, et d'autre part la biomasse aérienne constituant les tiges, les feuilles puis les organes reproducteurs. Dans le modèle SARRA-H la répartition de la production carbonée entre les différentes composantes de la plante est gérée jusqu'à floraison par des règles empiriques allométriques [Alhassane 2009](#), [Traoré et al. 2010](#).

### 3.2 Problématique et démarche

Dans les zones à climat typique des savanes soudaniennes (régime annuel des pluies monomodal, faibles altitudes), des études réalisées (au Mali, Sénégal, Niger) ont montré que l'on peut utiliser pour différentes céréales, dont le mil et le sorgho, une relation linéaire entre le quotient (biomasse feuille / biomasse aérienne) et la biomasse aérienne avant la floraison [Samba et al. 2001](#) ; [Alhassane 2009](#). Les relations allométriques permettent de mieux apprécier la répartition des assimilats dans les différentes parties de la plante [Van Oosterom et al. \(2002\)](#), [Alhassane 2009](#), [Traoré et al. 2010](#). Deux types de relations de répartition sont généralement décrits : tout d'abord une relation de répartition entre les racines et les parties aériennes, puis une relation de répartition entre les tiges et les feuilles. Dans cette étude, l'on s'est intéressé à la relation de répartition entre la biomasse des feuilles et la biomasse aérienne et on se demande si :

- **La relation utilisée dans le modèle SARRA-H reste-t-elle robuste et valable dans les conditions rencontrées au Mont Kenya (régime annuel des pluies bimodal, hausse des précipitations en fonction de l'élévation et la tendance inverse pour les températures) ?**

Cette étude a donc pour objectifs dans un premier temps de déterminer pour les différentes variétés les relations allométriques liant les biomasses des tiges et des feuilles, afin de voir dans un second temps s'il serait possible d'établir des relations communes aux groupes de variétés. Pour cela il a fallu d'abord déterminer les biomasses (feuille, tige et aérienne) moyennes pour chaque date de prélèvement et pour chaque variété au niveau des deux sites ensuite comparer les pentes et les ordonnées à l'origine de la relation allométrique des groupes de variété.

### 3.3 Matériel et méthode

Les données de cette étude ont été acquises au cours de l'expérience de mesure de biomasse et de rendement. L'essai comportait les 5 variétés de l'étude semis mensuels.



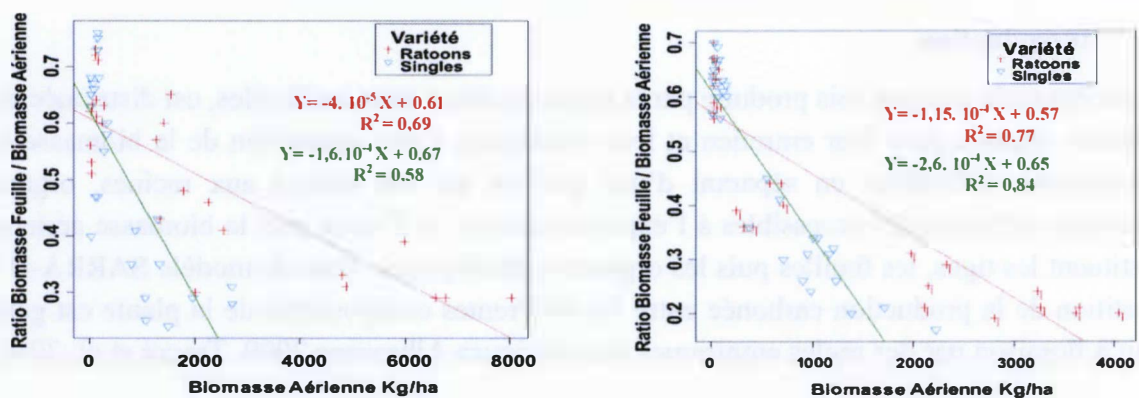


Figure 10: relations entre la biomasse feuille et la biomasse aérienne des variétés étudiées pendant les campagnes 2009-2010 et 2010-2011 à gauche Kiboko et à droite Weru.

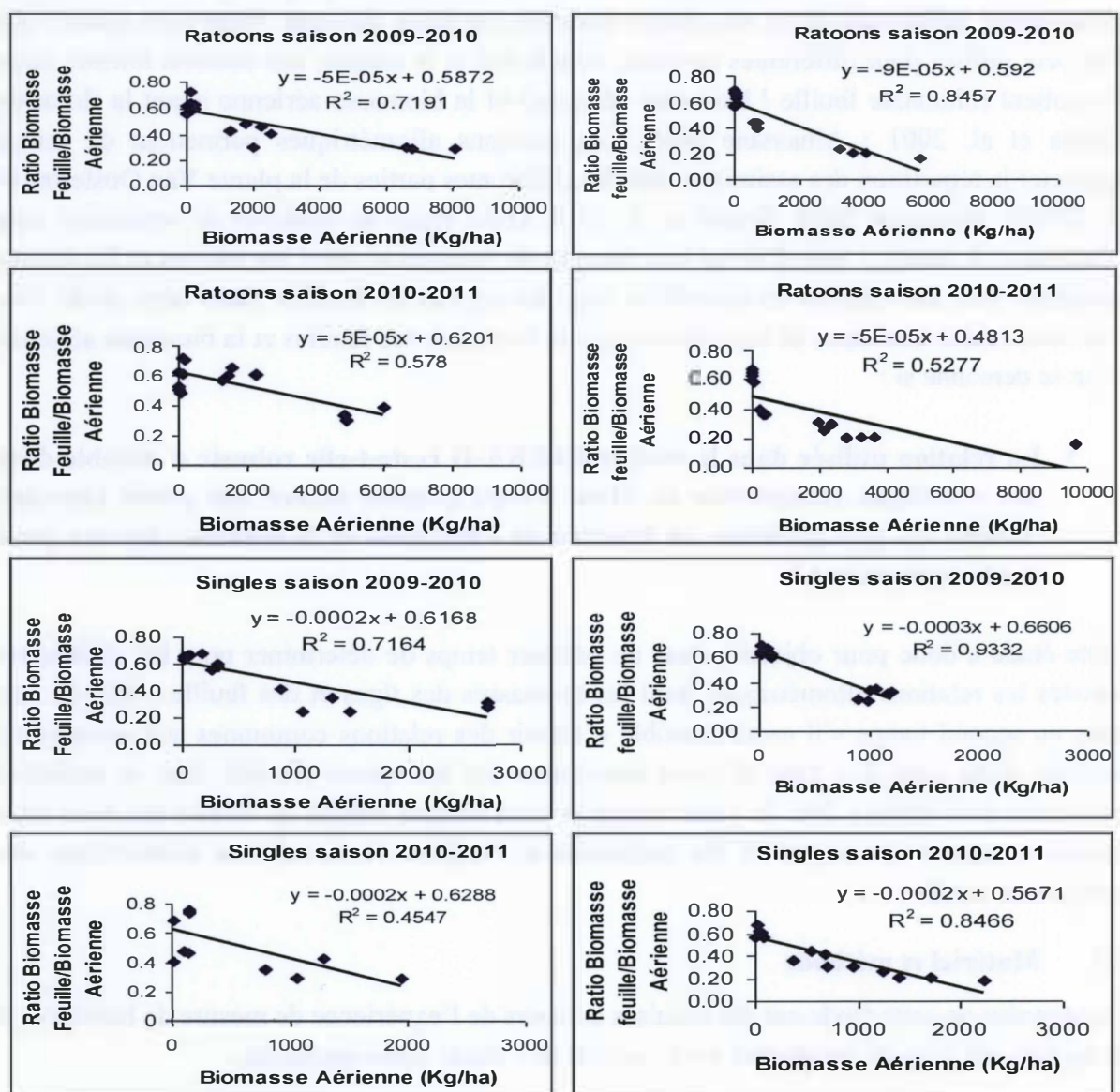


Figure 11 : relation allométrique par groupe de variété (les 4 premières figures pour les ratoons et les 4 autres pour les singles) durant les campagnes 2009-2010 et 2010-2011 à gauche Kiboko et à droite Weru.

### 3.3.1 Mesure de biomasse

Le suivi de l'accumulation de biomasse aérienne a permis de mesurer la biomasse feuilles et tiges par des prélèvements destructifs des plants tous les 15 jours environ jusqu'à l'apparition de la feuille drapeau, dans les parcelles élémentaires réservées à cet effet, dans tous les essais. Il y a eu au total quatre prélèvements 15, 30, 50 jours après semis et à la feuille drapeau par campagne expérimentale et par essai.

### 3.3.2 Méthode

Les biomasses sèches aériennes totales et les biomasses feuilles observées jusqu'à la floraison ont été mises en relation selon la modalité : ratio « biomasse feuille / biomasse aérienne » en fonction de biomasse aérienne. Ces relations ont été établies à partir des données recueillies au cours de l'expérimentation mesure de biomasse et de rendement dans lesquelles les variétés étaient étudiées. La comparaison des pentes et des ordonnées à l'origine des équations des différentes relations allométriques a été faite à partir des analyses statistiques avec les logiciels R et XLSTAT 2012. En utilisant par exemple l'analyse de covariance, notre but était d'étudier comment la pente de la relation allométrique varie en fonction du site (variable qualitative prenant la valeur Kiboko ou Weru), de l'année et de la biomasse aérienne produite, et de vérifier si cette relation linéaire a un sens. La régression linéaire nous a permis de forcer une valeur commune de pente et de l'ordonnée à l'origine pour chaque groupe de variété.

## 3.4 Résultats et Discussion

Les variétés, ou plutôt groupes variétaux, possèdent des caractères morphologiques propres dont on peut rendre compte par des lois de répartition de leurs biomasses. La robustesse de la relation allométrique a été testée sur les variétés de sorgho de cycles différents. Les résultats (Figure : 10) font ressortir deux dynamiques de répartition de biomasse au niveau des deux sites. Ces résultats sont conformes aux résultats obtenus au 2.4.1, qui ont fait sortir deux groupes de variétés phénologiquement distincts. Nos résultats montrent que le quotient (Biomasse feuille / biomasse aérienne) et la biomasse aérienne avant la floraison a une équation spécifique à chaque groupe de variété. Et cela, malgré les différences de production de biomasse d'une année à l'autre et d'un site à l'autre. Il faut noter que les pentes des relations allométriques sont quasiment les mêmes au sein d'un site et d'une année à l'autre pour le même groupe de variété. Il est ressorti de cette étude que la pente et la base de la relation ne varient pas pour les groupes de variété (pente au tour de  $-510^{-5}$  pour les ratoons et  $-0,0002$  pour les singles et une base variant entre 0,48 et 0,66). Cependant, ces coefficients ont légèrement varié surtout à Weru où on a observé une pente =  $-910^{-5}$  et une base variant entre 0,48 et 0,59 pour les ratoons et entre 0,56 et 0,66. Nos résultats nous permettent d'une part de forcer l'ordonnée à l'origine à 0,6 et admettre que les pentes sont les mêmes d'un site à l'autre (Figure 11) mais ne nous permettent pas d'autre part, de conclure et d'affirmer que cette relation n'est pas affectée par le stress hydrique comme l'ont démontré Samba et al. 2001 ; Anonyme 2002 ; Alhassane 2009 et Traoré et al. 2010 au Sahel ni par la fertilité du sol.

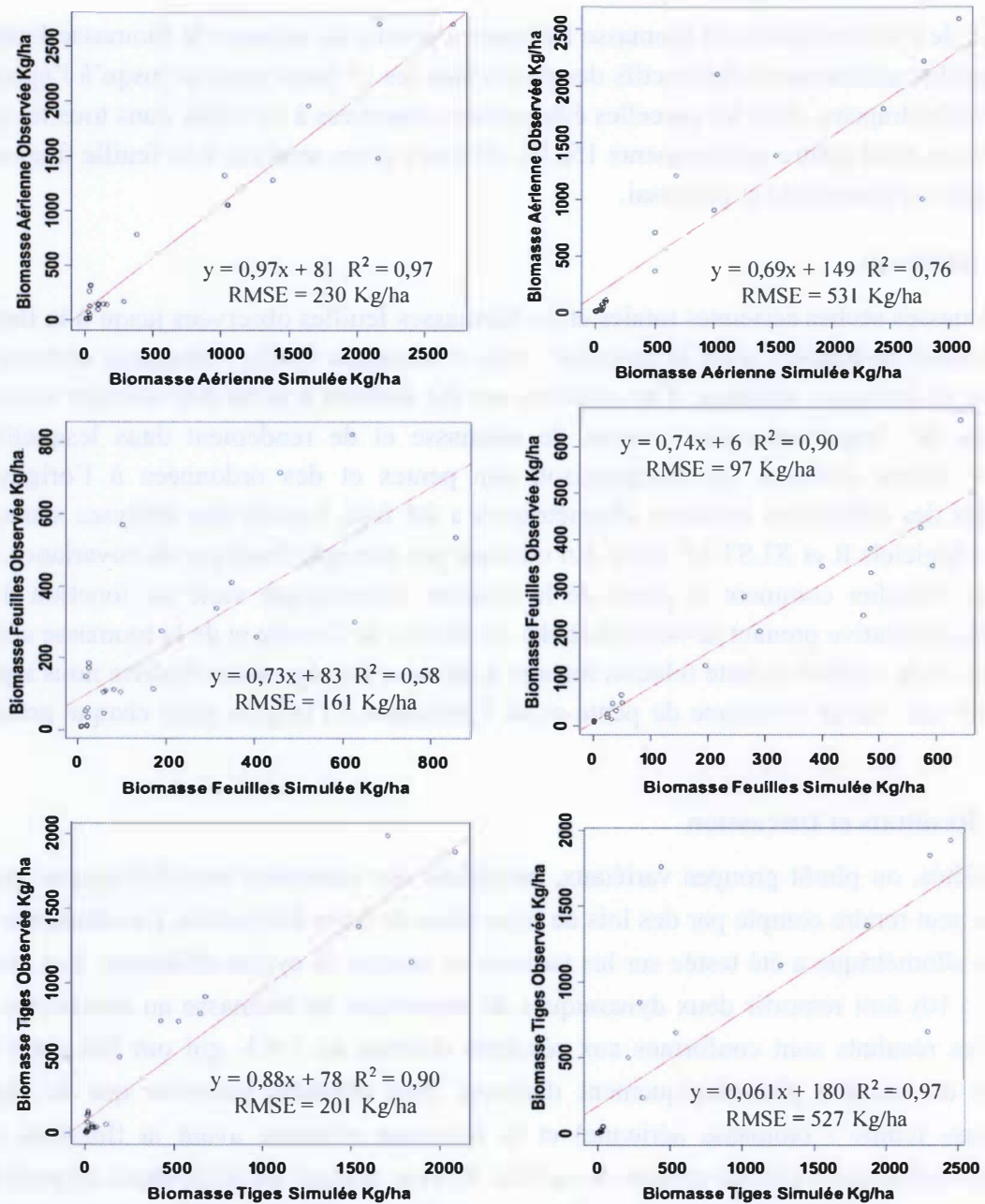


Figure 12 : Relation entre les biomasses (Kg/ha) feuilles, tiges et aériennes simulées et les biomasses (Kg/ha) feuilles, tiges et aériennes observées à gauche Kiboko et à droite Weru.



En plus, il est important de souligner que les pentes ont tendances à être plus fortes à Weru. Les différences observées dans la relation entre la biomasse des feuilles et la biomasse aérienne pourraient s'expliquer par la dynamique de tallage, ce qui corrobore les résultats de Siene et al. 2010 sur le mil. Les différences des pentes et des ordonnées à l'origine sont très probablement dues à des sénescences rapides de feuilles dues probablement à des stress hydriques au début du développement végétatif car la production des feuilles est fortement influencée par le régime hydrique et par le niveau de la fertilisation azotée. Une sénescence accélérée des feuilles pendant la phase végétative entraîne une réduction de l'indice foliaire dont la réduction conduit à une diminution des échanges gazeux aboutissant à une réduction de la production de la matière sèche. En dépit de la sécheresse observée durant la courte saison 2010, il est certainement difficile de dire si cette relation est affectée ou pas par le stress hydrique, mais dépendrait probablement du stade de développement de la plante conformément aux résultats obtenus par Samba et al. 2001 ; Anonyme 2002.

Comme l'ont dit Samba et al. 2001 ; Anonyme 2002 ; Alhassane 2009 la relation linéaire établie entre la biomasse feuille et la biomasse aérienne de nos groupes de variété semble ne pas changer, ni avec la longueur du cycle chez les variétés photopériodiques, ni avec le niveau de développement de la biomasse. Cependant, la dépendance de la production de biomasse sèche vis-à-vis par exemple des conditions environnementales (alimentation hydrique et fertilité du sol) entraînant très souvent des différences dans la croissance et le développement des céréales en général et du sorgho en particulier d'une parcelle à l'autre et même d'une année à l'autre nous suggère de prendre nos résultats avec réserve.

Pour ce qui est de la calibration de la biomasse (feuilles, tiges et aériennes), rappelons que nous avons modifié que les valeurs de la pente et de l'ordonnée à l'origine de la relation allométrique. Les résultats des simulations avec les valeurs -0,00016 et 0,60 de la pente et de l'ordonnée à l'origine de la relation allométrique ont été confrontés aux observations pour évaluer sa qualité prédictive du modèle. La figure 12 présente les résultats de la relation entre les biomasses feuilles, tiges et aériennes observées et simulées au niveau des deux sites. Bien que les coefficients de corrélations soient dans l'ensemble bons, les valeurs élevées des RMSE nous laissent penser à une amélioration de la calibration de la pente de la relation de répartition biomasse aérienne - biomasse totale, la base de la relation de répartition biomasse aérienne-biomasse totale, la pente de la surface massique des feuilles et les surfaces massiques des feuilles.



### 3.5 Conclusions

Les résultats qui sont présentés dans ce chapitre sur la robustesse de la méthode de répartition de biomasse utilisée dans SARRA-H au Kenya, montrent que la relation allométrique entre le ratio « biomasse feuille / biomasse aérienne » en fonction de biomasse aérienne semble être la même pour les variétés du même groupe. Cependant, du fait que le taux de tallage chez le sorgho et le mil varie avec la densité de semis [Diouf 1990](#) ; [Van Oosterom et al. 2001](#) et que la relation entre la biomasse feuille et la biomasse aérienne serait influencée par cette dynamique de tallage, alors que, le ratio « biomasse feuille / biomasse aérienne » et biomasse aérienne est quant à lui, affecté par la densité [Siene et al. 2010](#), il serait donc nécessaire de faire des nouvelles expérimentations pour étudier et élucider l'effet de ces différents facteurs afin de confirmer ces résultats car s'ils sont vérifiés, il s'agira d'une caractéristique variétale robuste et pratique à utiliser sur le plan opérationnel et de la modélisation des cultures. A la fin de ce chapitre on a pu forcer les pentes et les ordonnées à l'origine pour chaque groupe de variété afin de disposer pour ces groupes de variétés d'une relation allométrique unique permettant de simuler pour chaque date de semis la biomasse feuilles, tiges et aérienne et par conséquent le rendement, mais au vu des résultats obtenus il est nécessaire de parfaire la calibration .

## Chapitre 4 Mortalité juvénile des plants et gestion des semis

### 4.1 Introduction

La zone du degré carré de Niamey au Niger a été le site privilégié de plusieurs études sur la variabilité spatiale et temporelle de la pluviométrie, notamment lors des expériences internationales HAPEX-Sahel et EPSAT [Lebel et Le Barbé 1997](#). Les résultats de ces études ont montré la très forte variabilité de la pluviométrie non seulement événementielle, mais aussi cumulée sur tous les pas de temps, de la décade au mois et sur la saison à l'échelle d'un degré carré. Et quelque soit la stratégie adoptée par les agriculteurs, semis en « sec » ou « en humide », les cultures sont exposées aux aléas climatiques induit par l'intermittence des pluies [Marteau 2010](#).

### 4.2 Problématique et démarche

Dans la ceinture sahélienne de l'Afrique de l'ouest, le choix d'un couple " variété - date de semis" est une décision clé pour faire face aux contraintes climatiques et réussir au mieux la campagne agricole. Plusieurs méthodes sont proposées pour définir la date de semis [Kowal and Knabe 1972](#) ; [Benoît 1977](#) ; [Sivakumar 1988](#) ; [Ati et al. 2002](#). La plupart reposent sur des critères climatiques liés à des seuils de pluie, à un intervalle de temps de test et un critère de sécheresse. Le plus souvent cité est le critère de [Sivakumar](#) basé sur une quantité de 20 mm de pluies recueillies en 3 jours consécutifs après le 1er mai sans période sèche supérieure à 7 jours dans les 30 jours qui suivent. D'autres méthodes le définissent, soit à partir d'un seuil d'évapotranspiration potentielle, soit à partir d'une combinaison de deux types de variables [Maud et al. 2005](#). Ces méthodes posent cependant, plusieurs problèmes soient de spécificité des conditions climatiques (variation de la demande climatique (ET<sub>o</sub>) et donc des incidences sur les valeurs seuils retenues), soient de spécificité des sols et des espèces/variétés (en fonction des sols la capacité de stockage et le bilan hydrique, surtout pour l'horizon de surface, varient, de même en fonction des espèces le temps d'émergence temps d'humectation varie et donc le stock d'eau utile) et enfin, ils ne tiennent pas compte des stratégies paysannes et des problèmes de gestion des semis (selon les contraintes et les risques associés le paysan peut opter sur plusieurs stratégies de semis dans ses parcelles et donc de semer plus ou moins tardivement au regard du démarrage de la saison utile des pluies). L'algorithme de calcul de la date de semis implémenté dans la version SARRA-H, pour simuler un semis réussi, prend en considération, non plus les seules quantités pluviométriques mais les spécificités de la plante et du sol au même titre que la stratégie des paysans. Dans cette approche, la date de semis est déterminée par un seuil d'eau disponible dans le sol à la fin de la journée, assurant ainsi une disponibilité en eau suffisante pour l'émergence de la plante, ce seuil étant spécifique aux espèces/variétés. La réussite du semis, c'est-à-dire la capacité de survie de la plante juvénile soumise à une situation de manque d'eau, est évaluée au travers d'une relation de type *source-puits* se traduisant en cas de stress important en une diminution de biomasse due à la respiration de maintenance des plantes.

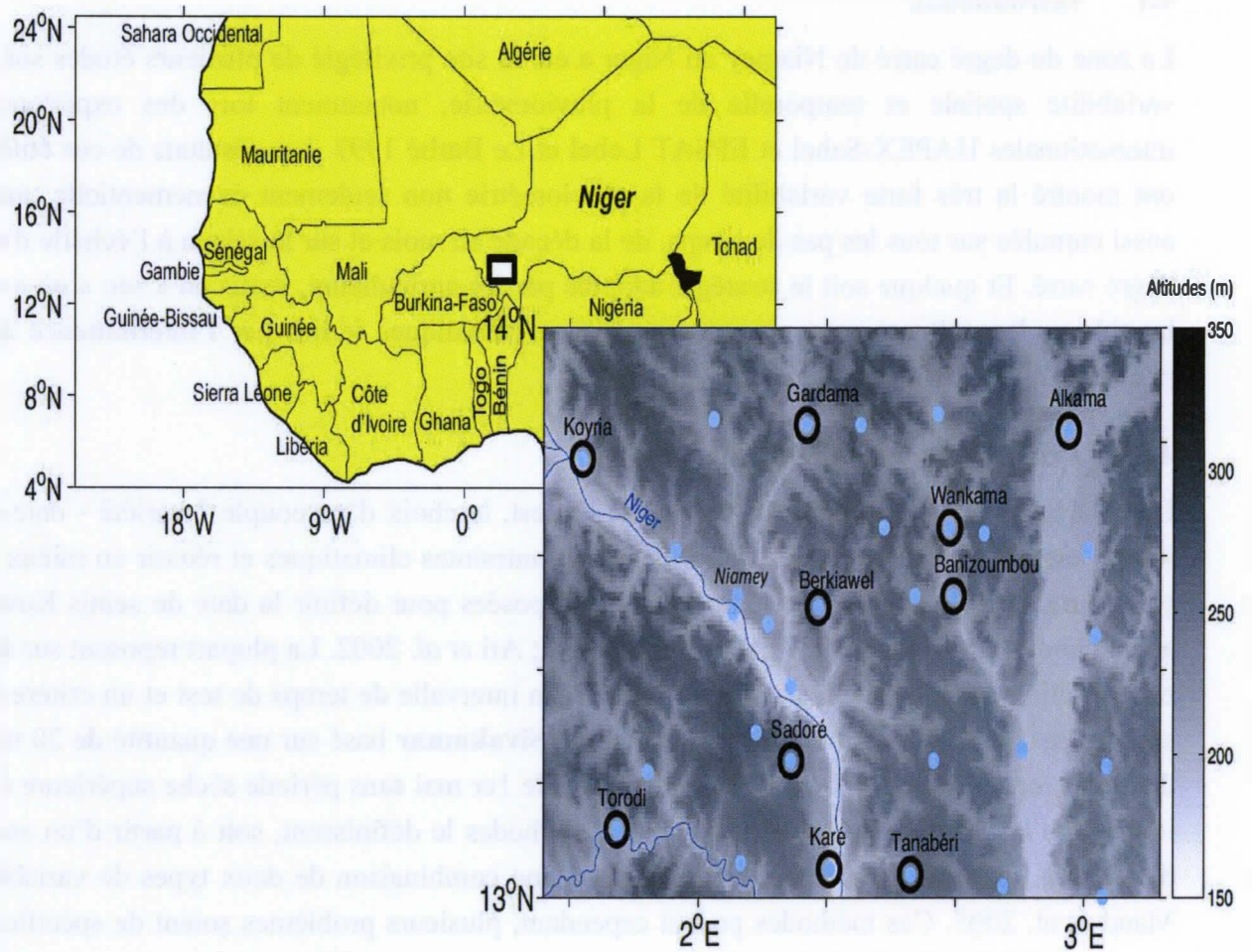


Figure 13 : Carte d'Afrique de l'Ouest et localisation des 30 pluviographes au sein de l'observatoire méso-échelle AMMA-CATCH Niger. Les cercles noirs indiquent les 10 villages enquêtés et documentés par des données agronomiques durant les hivernages 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009 et 2010.

**NB :** Ce site, localisé au cœur de la bande sahélienne dans le SW du Niger, couvre une superficie d'environ 16 000 km<sup>2</sup> (soit l'équivalent d'un point de grille de GCM de 1° × 1° de résolution), au sein duquel est implanté un réseau de 30 pluviographes automatisés à auget. Les pluviomètres fournissent des enregistrements quotidiens, entre le 15 avril et le 15 octobre de chaque saison (ces dates correspondent aux dates de mise en place et de retrait des pluviographes), durant la période 1990-2010. En dépit de l'automatisation des pluviographes et d'un suivi technique régulier, le contingent de données lacunaires reste non négligeable, atteignant plus de 6 % des valeurs sur la période 1990-2010.



Durant le stade juvénile, si, suite à un semis, on enregistre une diminution importante de la biomasse totale de la plante, cette dernière sera considérée morte. Le semis aurait donc échoué et le test pour un nouveau semis est automatiquement déclenché.

Pour les variétés de l'étude, le test de mortalité des plantules implémenté dans le modèle SARRA-H, considère que si durant les 20 premiers jours après le semis, 11 jours enregistrent une décroissance de la biomasse, le semis échouera, car le *puits*, c'est-à-dire la consommation d'amidon, est supérieur à la *source*, c'est-à-dire la production d'amidon, et par conséquent la biomasse décroît en raison de phénomènes de réallocations de l'amidon provenant des feuilles et des tiges.

- ❖ Quel seuil minimum de stock d'eau dans le sol, ici spécifique au Mil, uniforme pour le déclenchement des semis valable pour tous les villages du site d'étude?
- ❖ Quelle est la capacité du modèle à reproduire la mortalité juvénile des plantes ?
- ❖ Comment appréhender les périodes favorables au semis au regard de la diversité des situations (climat x plantes x sol)?
- ❖ Peut-on spécifier et modéliser les stratégies de semis des paysans?

### 4.3 Matériels et Méthode

#### 4.3.1 Matériels

Les données pluviométriques (Figure : 13) sont issues du centre régional AGRHYMET (Niger). Les pluviomètres fournissent des enregistrements quotidiens, entre le 15 avril et le 15 octobre de chaque saison durant la période 1990-2010. Les données d'enquêtes agricoles consacrées à la culture du mil menées entre 2004 et 2010 ont été récupérées. Ces enquêtes étaient réalisées sur un échantillon de 10 villages. Dans chaque village, 30 parcelles de mil ont été choisies au hasard de façon à ce qu'elles soient a priori représentatives de tous les champs du village et à une distance maximale de 2 km de rayon autour du pluviomètre. Les informations collectées dans chaque parcelle portaient sur la date de semis et re-semis, le type de sol, la topographie de la parcelle (position et pente), l'apport ou non de fertilisants (et leur type), la variété, la densité, les dates des différents stades phénologiques, les éventuels dégâts subis au cours du cycle et leur origine et enfin les rendements en grains et en paille à la récolte.

#### 4.3.2 Méthode

##### 4.3.2.1 Dates de semis et re-semis

Pour les dates de semis et ré-semis, quand les dates sont très proches (moins de 10 jours), on les a regroupées en une seule vague de semis rapportée à la première date qui en général correspond à l'occurrence d'une pluie la veille ou le jour même, puis des scénarii de simulation regroupant l'ensemble des parcelles d'un village ayant une même date ou vague de semis et une même variété sont élaborés : selon les années et villages on observe une à trois vagues de semis pour une à deux variétés de Mil locaux.



Afin de gérer le paramètre date de semis, nous avons analysé la distribution des dates de semis observées. A partir de cette distribution, nous avons retenu trois classes de date de semis (précoce, intermédiaire et tardive). La méthode utilisée est celle de partitionnement univarié, qui a consisté à regrouper les dates de semis observées dans 3 classes homogènes. L'homogénéité a été mesurée au travers la somme des variances intra-classe. Pour maximiser l'homogénéité des classes, on a cherché donc à minimiser la somme des variances intra-classe. Les variétés (3), les dates et densités de semis ainsi que les caractéristiques hydriques des sols observés sur les parcelles paysannes ont été spécifiées au modèle pour effectuer les simulations. Les dates de début de simulation pour les deuxièmes, dates de semis sont définies dans l'intervalle compris entre les premières et les secondes dates de semis. Nous avons fait de même jusqu'à la quatrième date de semis.

#### **4.3.2.2 Paramétrage et calibrage sur les variétés de mil**

Un premier jeu de paramétrage et calibrage est effectué dans le souci d'homogénéiser les paramètres au maximum de telle sorte que seuls quelques paramètres (sensibilité à la photopériode, potentiel de rendement, etc.) diffèrent selon la variété et les conditions de culture considérées. Les paramétrages obtenus pour la variété HKP ont été appliqués aux parcelles paysannes semées avec la variété Hainy Kirey et ceux obtenus pour la variété MTDO aux parcelles semées avec la Somno. Au cours de ce paramétrage nous avons agi principalement sur les paramètres suivants : AéroTotPente et dans certains cas nous avons ajusté les phases phénologiques. Et principalement, les SLAmax et SLAmin, SLApende du fait qu'on a constaté une certaine différence avec la courbe d'Affholder 1997 pour les valeurs élevées des tous premiers jours du cycle. Pour déterminer la quantité minimale d'eau dans le sol nous avons fait varier le paramètre stock d'eau dans le sol superficiel (SeuilEauSemis) jusqu'à trouver des dates de semis et ré-semis simulées les plus proches des dates observées, la valeur retenue pour les situations observées est de 9 mm en fin de journée. Dans le modèle la pluie du jour est prise en compte en début de journée et l'évaporation du sol superficiel a donc été déduite durant la journée.

#### **4.3.2.3 Scores retenus pour estimer les performances du modèle**

- ✚ Score de réussite ou de bonnes prévisions : ce score de réussite (annexe 2) permet d'estimer assez rapidement les performances d'un modèle. Algébriquement, il se résume en un simple calcul de pourcentage de prévisions correctement réalisées et se définit à partir d'un tableau de contingence.
- ✚ Score de réussite de Heidke : Le score de Heidke (annexe 2) est bien approprié à la vérification des performances d'un modèle discrétisé en 2 classes Von Storch et al. 1999. Le score de réussite de Heidke caractérise la qualité de la prévision par rapport à une prévision faite au hasard Murphy 1993. Si le score est égal à 1 alors la prévision est parfaite, et 0 pour une prévision due au hasard. Une valeur négative est trouvée si la prévision est moins bonne que le hasard.

## 4.4 Résultats et Discussions

### 4.4.1 Seuil eau semis

Afin de déterminer le stock d'eau dans le sol pour le calcul de la date de semis au plus tôt au regard des pratiques des agriculteurs sur le site de Niamey, une optimisation du paramètre SeuilEauSemis a été réalisée. A la fin de l'optimisation on remarque qu'on obtient des très bons résultats avec la valeur 9 mm figure 14.

Ces résultats montrent malgré tout que le seuil de pluie de 20 mm Sivakumar 1988 fixé dans la définition du démarrage de la saison des pluies est clairement différent de la stratégie des paysans.

### 4.4.2 Relation entre la date de semis réussis simulée versus semis réussis observée

L'analyse de la relation entre les dates de semis observées et simulées (figure 15), montre qu'un peu plus de **55 % des dates de semis observées sont correctement reproduites par le modèle SARRA-H sur la période 2004-2010.**

L'échec du semis semble lié à la conjugaison d'un événement pluvieux cumulant moins de 9 mm en moyenne dans le sol, suivi par une séquence sèche plus ou moins longue en début de saison. Alors que les semis réussis sont concomitants avec un événement pluvieux plus intense avec plus de 9 mm d'eau dans le sol suivi par une succession de jours pluvieux dans les jours qui suivent le semis. On constate que les dates de semis observées en milieu paysan et les dates de semis de SARRA-H sont proches les années où il n'y a pas eu assez de semis à sec. Ce qui montre que, la variabilité interannuelle de la date de semis observée apparaît dans une moindre mesure bien simulée par SARRA-H.

On note que les dates de semis observées de l'année 2004 sont reproduites par le modèle SARRA-H. L'événement pluviométrique du 29 avril 2004 a été bien détecté par le modèle pour tous les villages mais la sécheresse de plus de 11 jours sur les 20 jours qui ont suivi le semis a fait que le semis a échoué pour le modèle alors que ces semis ont réussis, ce qui justifie les 55% des dates de semis réussies par le modèle. En plus plusieurs dates de semis observées étaient des semis à sec, ce qui justifie de plus le résultat bien que satisfaisant. Néanmoins, l'amplitude entre les semis les plus précoces en 2004 et les semis les plus tardifs en 2004 est de 92 jours dans l'observation contre seulement 33 jours dans le modèle SARRA-H. Cela signifie que les critères définis dans le modèle SARRA-H sous-estiment les variations interannuelles de la date de semis.

### 4.4.3 Evaluation de la performance du modèle

Cette section s'attache à analyser les scores du modèle avec les prédictions de type vrai-vrai, faux-faux et les éternelles situations vrai-faux et faux-vrai. Et on fait l'hypothèse qu'on peut créer des scénarii des stratégies précoce, intermédiaire et tardif permettant de capter plusieurs vagues de semis dans un village comme on l'observe.

On se demande, si le modèle est bon pour simuler les dates de semis précoces ? Les dates de semis intermédiaires ? Et les dates de semis tardives ?

Le partitionnement univarié (annexe 3), a consisté à regrouper les dates de semis observées en 3 classes homogènes. A partir de ces résultats une transformation de l'information quantitative date de semis en information qualitative précocité, ... (annexe 2) a été réalisée afin de mettre en place les tableaux de contingence (Tableau 4, 5, 6 et 7).

Il apparaît d'ores et déjà que le modèle est plutôt performant puisque les tableaux de contingences se traduisent par une diagonale bien remplie. Les erreurs graves sont rares laissant entrevoir des performances plutôt bonnes pour le modèle. Le tableau 8 présente les résultats des scores de performance calculés pour évaluer le modèle SARRA-H. Ces résultats permettent en dernier lieu de juger la performance du modèle en terme de restitution des dates de semis par stratégie de semis. Les dates de semis (précoce, intermédiaire et tardif) observées sont toujours bien simulées, quoique des améliorations doivent être apportées afin d'améliorer les scores d'évaluation.

#### **4.5 Conclusion**

Les performances du modèle SARRA-H pour simuler les dates de semis sont acceptables au vu de la complexité de la relation entre la date de début de la saison des pluies et les stratégies de semis en milieu paysan. Les résultats présentés montrent, que le modèle SARRA-H simule assez correctement la variabilité dans le temps des dates de semis (d'une année à l'autre), mais il simule passablement la variabilité dans l'espace lorsque le début de la saison des pluies est précoce, comme en 2004, nos résultats vont dans le même sens que les conclusions de [Marteau 2010](#). Enfin, quelque soit la stratégie adoptée par les agriculteurs, semis en « sec » ou « en humide », les cultures seront exposées aux aléas climatiques induits par l'intermittence des pluies et qu'il serait intéressant de pouvoir utiliser les bons algorithmes pour rendre compte de l'effet des périodes à forte pluviométrie dont la conséquence est que des quantités réduites d'eau s'infiltrant en réalité dans le sol et cela peut modifier plusieurs conditions agronomiques qui peuvent être favorables au développement de la plante.



## CONCLUSION ET PERSPECTIVES

### 1 Rappel des objectifs

Ce travail visait à répondre aux objectifs suivants :

- ✓ étudier les effets d'un transect altitudinal sur la croissance et le développement des variétés locales de sorgho au Kenya afin de les caractériser,
- ✓ appréhender les périodes favorables au semis au regard de la diversité des situations (climat x plantes x sol) afin de spécifier et modéliser des stratégies de semis.
- ✓ pour enfin, améliorer le paramétrage et la calibration du modèle de culture SARRA-H pour les prévisions agricoles de la parcelle cultivée à la région.

Pour répondre à ces objectifs, des données issues de deux projets différents (PICREVAT Kenya et AMMA-CATCH Niger) ont été utilisées. Notre étude s'est ensuite déroulée selon trois axes qui ont permis :

- de caractériser les variétés locales de sorgho au Kenya, permettant d'améliorer la paramétrisation du modèle SARRA-H sur ces variétés,
- de vérifier la robustesse de la relation de répartition de biomasse utilisée dans le modèle sur ces variétés,
- et enfin, de vérifier la capacité du modèle à reproduire la mortalité juvénile des plantes et la gestion des semis.

### 2 Synthèse des résultats

Les principales conclusions auxquelles nous avons abouti à l'issue de ce travail peuvent être synthétisées en trois points :

- les variétés de sorgho étudiées ont montré clairement deux types de matériels phénologiquement distinct : les singles à panicules compactes et à cycle régulier sur toute l'année (pas ou peu photosensibles) et les ratoons à panicules lâches dont le cycle varie dans l'année (variétés photosensibles ?). Les résultats de la caractérisation des variétés (singles) ont permis de redéfinir les paramètres phénologiques du modèle SARRA-H et d'en vérifier sa capacité prédictive. Le modèle rend en particulier bien compte des phases et cycles de développement des singles, par contre pour les ratoons, les écarts restent grands. Enfin, le(s) mécanisme(s) de réponse de ces variétés aux contraintes climatiques contrastées du Mont Kenya n'est pas ou ne sont pas totalement élucidés et les questions posées restent du domaine de la recherche.
- les résultats sur la robustesse de la dynamique de répartition de la biomasse montrent que l'on peut toujours établir une relation linéaire entre le ratio (biomasse feuille / biomasse aérienne) et la biomasse aérienne jusqu'à la feuille drapeau. Les régressions linéaires entre les deux groupes de variété étudiés ont permis de définir les pentes et les ordonnées à l'origine de la relation allométrique différents selon le groupe de variété. Cependant, des études complémentaires sont nécessaires pour vérifier l'effet de certains facteurs clés comme la densité de semis et le taux de tallage.

○ les performances du modèle SARRA-H pour simuler les dates de semis sont acceptables en regard de la complexité de la relation entre la date de début de la saison des pluies et les stratégies de semis en milieu paysan. Enfin, le choix d'une stratégie de semis qui dépend fortement de l'appréciation de la situation par le paysan en fonction du retard dans l'installation de la saison des pluies, de la disponibilité de main d'œuvres pour le semis, de l'extension de la superficie à cultiver, des croyances ancestrales ou encore de ses propres stratégies par rapport au risque climatique [Martini 1994 cité par Marteau 2010](#) sont des choses difficiles à modéliser et le modèle SARRA-H ne sait pas le faire.

### **3. Perspectives de recherches**

Les données concernant la phénologie ont été recueillies pendant 24 mois et ont donc été nettement plus nombreuses que les données de mesure de biomasse pour lesquelles des vérifications et des études complémentaires restent nécessaires afin de valider la robustesse de la relation de répartition de biomasse. Il serait utile de vérifier par des études appropriées l'effet de la densité de semis, du taux de tallage et de la qualité de l'éclairement perçu par les feuilles, la fertilité du sol, ce qui ouvre des nouveaux champs de recherche.

Pour ce qui est du modèle, il apparaît donc que l'effet de certains facteurs comme la latitude devra être élucidé avant de pouvoir généraliser l'utilisation du modèle à l'ensemble d'une région. Pour ce qui est de l'effet de la latitude, cet effet demande à être éclairci par des expérimentations conduites sur une gamme de latitudes, du tropique à l'équateur. Les limites dans le temps du modèle indiquent bien qu'il est basé sur des relations décrivant bien des phénomènes sur un intervalle de temps concerné, mais qu'il est insuffisant pour décrire l'évolution tout au long de l'année. Il faudrait alors admettre des seuils de sensibilité différents entre les variétés, expliquant leur comportement différent. Nous pourrions tenir compte de la photopériode moyenne au lieu de la photopériode quotidienne ou tenir compte de la variation quotidienne de la photopériode et/ou de la photopériode à l'émergence qui peut influencer le seuil de sensibilité à la photopériode car la photopériode à l'émergence et la latitude sont proportionnelles.

En plus, au-delà de l'amélioration du paramétrage et de la calibration du modèle, la prévision agricole opérationnelle implique de pouvoir bien déterminer d'abord les situations agronomiques dominantes. Il serait donc bien de réexaminer attentivement toutes les situations agronomiques observées, pour identifier pour chacune les possibles contraintes et le degré d'incertitude sur les données.

Afin de se pencher à nouveau sur la calibration, pour améliorer et simplifier les paramétrages et pour valider à l'échelle d'une région les algorithmes gérant le seuil eau semis et de tester différentes hypothèses sur les caractéristiques des sols.

Pour finir, des améliorations restent à faire surtout en ce qui concerne l'algorithme de détermination de la phase photosensible et celui de la détermination de la date de semis automatique. On pourrait pour ce dernier cas par exemple introduire dans le modèle un processus de blocage/réduction de la biomasse produite par la plante au lieu de la tuer directement.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Affholder, F., 1997:** Empirically modelling the interaction between intensification and climatic risk in semiarid regions. *Field Crops Research*, 52, 79-93.
- Alhassane, A. 2009.** Effets du climat et des pratiques culturales sur la croissance et le développement du mil (*pennisetum glaucum* [L.] r.br.) au sahel : contribution à l'amélioration du modèle SARRA-H de prévision des rendements. Thèse de doctorat en physiologie végétale. Université de Cocody, RCI.
- Anonyme, 2002.** Modélisation de la croissance et de la productivité des cultures céréalières. Mise au point d'un SIG pour l'amélioration des systèmes de prévisions agricoles au Sénégal. Rapport technique du Fonds National de Recherches Agricoles et Agroalimentaires (FNRAA). 25 pp.
- Ati O.F., Stigter C.J., and Oladipo E.O., 2002:** A comparison of methods to determine the onset of the growing season in Northern Nigeria. *International Journal of Climatology*, 22, 731-742.
- Baron, C., Clopes, A., Perez, P., Muller, B., Maraux, F., 1996.** Manuels d'utilisation de: SARRAMET 45 p SARRABIL 35 p et SARRAZON 29 p. CIRAD, Montpellier, France.
- Baron. C. et M. Dingkuhn., 2003.** Modélisation menée par l'équipe Ecotrop, Cirad-amis, France. Présentation à l'atelier de formation tenu du 24-28 novembre 2003 à Montpellier sur le modèle SARRA-H ; Exemple du mil. CD-R.
- Benoît P., 1977:** The start of the growing season in Northern Nigeria. *Agricultural Forest and Meteorology*, 18, 91-99.
- Black E., Slingo J.M., Sperber K.R., 2003.** An observational study of the relationship between excessively strong short rains in coastal east Africa and Indian Ocean SST. *Monsoon Weather Review* 103: 74 - 94.
- Bonhomme, R., 1992.** Variation de la vitesse de floraison et du nombre de feuilles chez le maïs en fonction de la photopériode. *Bulletin Société Française d'Ecophysiologie*.
- Boote K.J., Jones J.W., Pickering N.B., 1996.** Potential uses and limitations of crop models. *Agronomy Journal* 88:704–716.
- Brisson N., Gary C., Justes E., Roche R., Mary B., Ripoche D., Zimmer D., Sierra J., Bertuzzi P., Burger P., Bussière F., Cabidoche Y.M., Cellier P., Debaeke P., Gaudillère J.P., Hénault C., Maraux F., Seguin B., and Sinoquet H., 2003.** An overview of the crop model STICS. *European Journal of Agronomy* 18:309-322
- Borchert. R, Susanne S. R, Zoraida C, Diego N, Alan T, Laurent G, Rodolphe S et Patricio von Hildebrand., 2005.** Photoperiodic induction of synchronous flowering near the Equator. *Letters to nature*.



- Camberlin P., Boyard-Micheau J., Philippon N., Baron C., Leclerc C., Mwongera C. 2011.** Climatic gradients along the windward slopes of Mount Kenya and their implication for crop risks - Part 1: climate variability. *International Journal of Climatology*. 32. 17 p.
- Cantini, C. 1995.** Manuel d'exercices sur le développement, la croissance et la production des plantes. *Ecophysiologie, Manuel technique Ce.S.I.A. N° 13 – 1995*. Ce. S.I.A.-accademia dei Georgofili-Italie. 100P.
- Caron P., 2005.** *Agricultures familiales et Mondes à venir*, Conférence de Paris, SIA, Actes de la conférence tenue à Paris, mars 2005, CIRAD, Montpellier, 110 p.
- Clerget. B., 2004.** Le rôle du photopériodisme dans l'élaboration du rendement de trois variétés de sorgho cultivées en Afrique de l'Ouest. Paris, France, Ecole Doctorale ABIES. (<http://pastel.paristech.org/view/institution/inapg.html>)
- Clerget. B., M. Sidibe., F. Clavijo-Torres., J. Chantereau, J.C. Evrard, A. Vidal, C. Luce., 2008.** *Ecophysiologie du sorgho. Rapport de la campagne d'hivernage 2006*.
- Cooper P. J. M., Gregory P. J., D. Tully and H. C. Harris., 1987.** Improving Water use Efficiency of Annual Crops in the Rainfed Farming Systems of West Asia and North Africa. *Experimental Agriculture*, 23 , pp 113-158.
- Curtis, D. L., 1968.** The relationship between the date of heading of Nigerian sorghums and the duration of growing season. *J. Appl. Ecol.* 5, 215-226.
- Debaeke P., Aboudrare A., 2004.** Adaptation of crop management to water-limited environments. *European Journal of Agronomy* 21:433–446.
- Dingkuhn. M. and Miézan. K.M., 1992.** Temperature related problems in Sahel irrigated rice. West Africa Rice Development Association. 01 BP 2551. Bouaké. Côte d'Ivoire. 81 p
- Dingkuhn, M.; C. Baron; V. Bonnal; F. Maraux; B. Sarr; B. Sultan; A. Clopes and F. Forest., 2003.** Decision support tools for rainfed crops in the Sahel at the plot and regional scales. In *Decision support tools for smallholder agriculture in sub-Saharan Africa: a practical guide*. (T.E. Struif Bontkes and M.C.S. Wopereis ed.) IFDC, Muscle Shoals, AL. USA. pp 127-139
- Dingkuhn, M., M. Kouressy, M. Vaksman, B. Clerget and J. Chantereau, 2008:** A model of sorghum photoperiodism using the concept of threshold-lowering during prolonged appetence. *European Journal of Agronomy* 28, 74-89.
- Diouf M, 1990.** Analyse de l'élaboration du rendement du mil (*Pennisetum typhoides* Stapf et Hubb.). Mise au point d'une méthode de diagnostique en parcelles paysannes. INA Paris Grignon. 227 pp.
- Doré, J. 1959.** Response of rice to small differences in length of day. *Nature* 183: 413-414.
- Dregne H.E, Willis W.O. (eds), 1983.** *Dryland Agriculture*. ASA Monograph 23. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, USA.

**Fenner M., 1998.** The phenology of growth and reproduction in plants. In Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics. Ed. Gustav Fischer Verlag, 1998. Vol. 1/1, pp. 78–91.

**Forest, F., 1984.** Simulation du bilan hydrique des cultures pluviales. Présentation et utilisation du logiciel BIP. Division Recherche - Développement Economie - Valorisation de l'Eau, Groupe eau, IRAT – CIRAD. 61p.

**Franquin P., 1981.** Modèles fréquentiels de la période climatique de végétation. Potentialités culturelles. Zn : Actes du neuvième colloque Informatique et Biosphère, Paris, p. 127-155.

**Ganzin, N., 1989.** Diagnostic hydrique des cultures. Utilisation du logiciel DHC de suivi opérationnel de campagne agricole. DMN-IRAT/CIRAD, Cellule de diagnostic hydrique des cultures, Programme Agrhymet Niamey financé par la coopération française, CILSSPNUD-OMM. 33p.

**Gerik T, Freebairn D., 2004.** Management of extensive farming systems for drought-prone environments in North America and Australia. Proceedings 4th International Crop Science Congress, Brisbane (Australia), [www.cropscience.org.au](http://www.cropscience.org.au), 9 p

**Hansen, J.W., 2002.** Realizing the potential benefits of climate prediction to agriculture: issues, approaches, challenges. Agric. Syst. 74, 309–330.

**Ingram, K.T., Roncoli, M.C., Kirshen, P.H., 2002.** Opportunities and constraints for farmers of West Africa to use seasonal precipitation forecasts with Burkina Faso as a case study. Agric. Syst. 74, 331–349.

**Jones H.G., F. Tardieu., 1998.** Modelling water relations of horticultural crops: a review. Scientia Horticulturae 74:21-46

**Ker A., 1995.** Farming Systems of the African savanna: a continent in crisis. International Development Research Centre, Ottawa, Canada. 176 p.

**Kouressy. M, Dingkuhn. M, Vacksmann. M, Heinemann. AB., 2008.** Adaptation to diverse semi-arid environments of sorghum genotypes having different plant type and sensitivity to photoperiod. Agricultural Forest and Meteorology, 148, 357-371.

**Kowal J.M., and Knabe D.T., 1972:** An Agro-climatological Atlas of the Northern States of the Nigeria with explanatory Notes. Ahmadu Bello University, Zaria, Nigeria, 128 p.

**Lawless C., M. A. Semenov and P. D. Jamieson., 2005.** A wheat canopy model linking leaf area and phenology. European Journal of Agronomy 22:19-32.

**Le Barbé L., and Lebel T., 1997:** Rainfall climatology of the HAPEX-Sahel region during the years 1950-1990. Journal of Hydrology, 188-189, 43-73.

**Okoola RE. 1990.** The stability of the south-east monsoons and the associated non-precipitating stratocumulus clouds over Eastern Africa. Third WMO Symposium on Meteor. Aspects of Tropical Droughts, Niamey, 30 Apr–4 May 1990. WMO Trop. Met. Res. Project Report, 36: 65–70.

**Okoola RE. 2000.** The Characteristics of Cold Air Outbreaks over the Eastern Highlands of Kenya. *Meteorology and Atmospheric Physics* 73: 177–187.

**Olesen J.E., B.M. Pertesen, J. Bernsten, S. Hansen, P.D. Jamieson, A.G. Thomsen., 2002.** Comparison of methods for simulation effects of nitrogen on green area index and dry matter growth in winter wheat. *European Journal of Agronomy* 16:279-294.

**Oram, P.A., 1989.** Sensitivity of agricultural production to climatic change, an update. *Climate and Food Security*, IRRI, Manila, Philippines, pp. 25–44.

**Pohl B., Camberlin P., 2006.** Influence of the Madden-Julian Oscillation on east African rainfall. I: intraseasonal variability and regional dependency. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 132: 2521 - 2539.

**Porter J.R., M. Gawith., 1999.** Temperatures and the growth and development of wheat: a review. *European Journal of Agronomy* 10:23–36.

**Rathcke B and Elizabeth P. Lacey., 1985.** Phenological Patterns of Terrestrial Plants.

**Ritchie, J. T., Singh, U., Godwin, D. C., Bowen, W. T., 1998.** Cereal growth, development and yield. In : G. Y. Tsuji, G. Hoogenboom and P. K. Thornton (Eds.), *Understanding options for agricultural production*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 79-98.

**Ruget F., N. Brisson, R. Delécolle, R. Faivre., 2002.** Sensitivity analysis of a crop simulation model, STICS, in order to choose the main parameters to be estimated. *Agronomie* 22:133-158.

**Sahrawat, K. L., T. J. Rego, J. R. Burford, M. H. Rahman, J. K. Rao and A. Adam, 1995:** Response of sorghum to fertilizer phosphorus and its residual value in a Vertisol. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 41, 41-47.

**Sié, M., 1997.** Analyse des contraintes photothermiques en vue de l'adaptation des variétés de riz irrigué au Sahel. Montpellier, France. Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie.

**Siene L., Bertrand. M., AKE S., 2010.** Etude du développement et répartition de la biomasse chez deux variétés de mil. *Journal of Applied Biosciences* 35: 2260 – 2278

**Summerfield. R.J., R.J., Roberts, E.R, Ellis,R.H., and Lawn, R.J., 1991.** Towards the reliable prediction of time to flowering in six annual crops. 1. The developement of simple models for fluctuating field environments.



**Samba, A. ; B. Sarr; C. Baron; E. Goze; F. Maraoux; B. Clerget et M. Dingkuhn. 2001.** La prévision agricole à l'échelle du sahel. In: Malézieux, E., G. Trébuil et M. Jaeger (Eds.), Modélisation des agro-écosystèmes et aide à la décision. CIRAD et INRA, Montpellier, France, pp 243-262.

**Sivakumar M.V.K., 1988:** Predicting rainy season potential from the onset of rains in southern sahelian and sudanian climatic zones of West Africa. *Agricultural Forest and Meteorology* 42, 295-305.

**Traoré S.B., Kouressy M., Muller B., Somé L., Alhassane A., Sultan B., Vintrou E., Sangaré S., Vaksman M., Diop M., Bégué A., Dingkhun M., Baron C., 2010.** Characterizing and Modelling the Diversity of Cropping Situations under Climatic Constraints in West Africa.

**Thomas. B., Vince-Prue, D., 1997.** Photoperiodism in plants. Academic Press, 428 pp. Tivet, F., 2000. Etude des facteurs génotypiques et environnementaux déterminant la mise en place de la surface foliaire chez le riz (*Oryza sativa* L. et *Oryza glaberrima* Steud.). Incidence particulière d'un déficit hydrique. Doctorat. Institut National Agronomique Paris-Grignon, Paris, 116 pp.

**Vaksman M, Traoré.S.B., et Niangado. O., 1996.** Le photopériodisme des sorghos africains. *Agriculture et développement*. N°9. Mars 96. pp. 13-18.

**Vaksman M, Abdulai, Alhassan Lansah , Kouressy, Mamoutou, Brueck, Holger Asch, Folkard , Giese, Marcus., 2012.** Effect of location on thermal time to panicle initiation in seven sorghum cultivars evaluated at three sowing dates along a North-South latitude gradient in Mali.

**Van Oosterom E.J., O'Leary G.J., Carberry P.S., Craufurd P.Q., 2002.** Simulating growth, development, and yield of tillering pearl millet. III. Biomass accumulation and partitioning. *Field Crops Research* 79, 85-106.

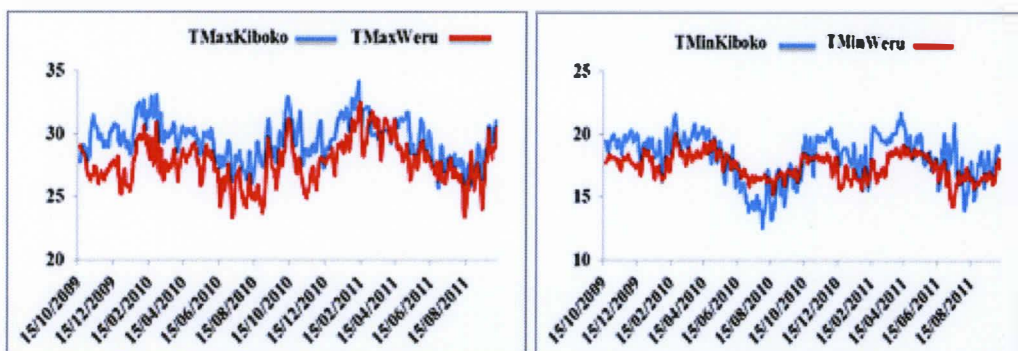
**Von Storch, H. and F.W. Zwiers, 1999:** Statistical Analysis in Climate Research. Cambridge University Press, Cambridge.

**Vossen P., Rikjs D., 1998.** Issues related to agrometeorological models when applying them for yield forecasting at a European scale. In. "Agrometeorological applications for regional crop monitoring and production assessment", D. Rijk, J.M. Terres, P. Vossen, European Commission eds.

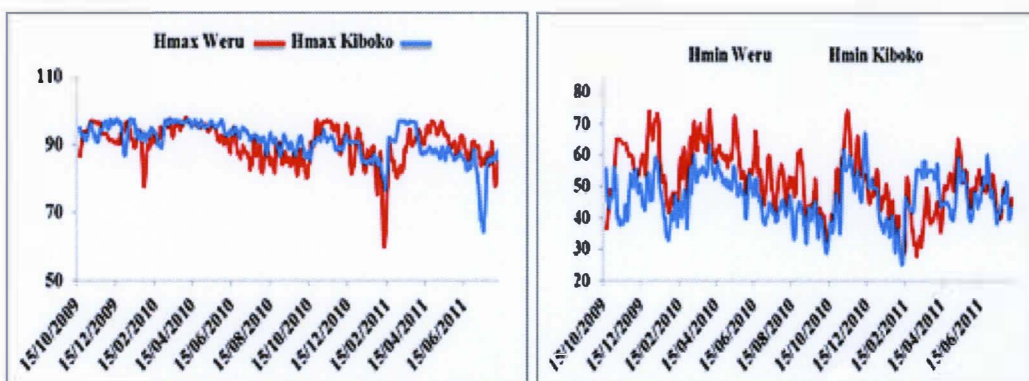
## Annexe

### Annexe 1 :

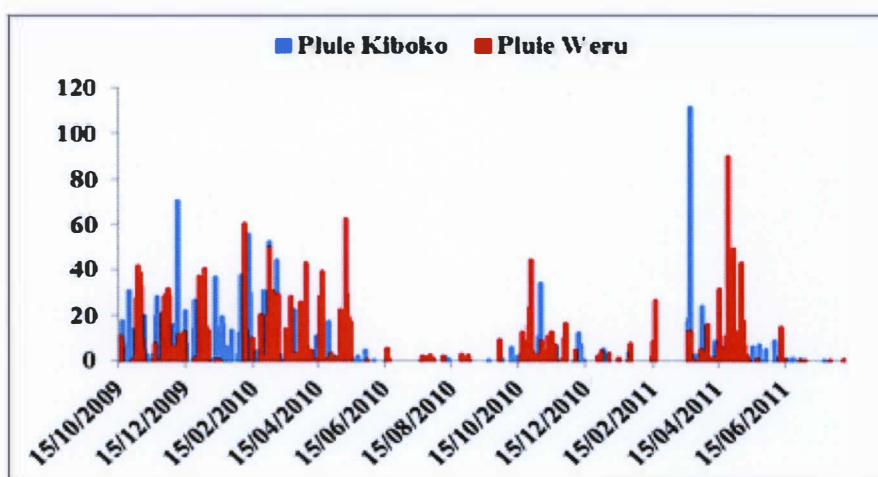
Variation des températures entre Kiboko et Weru



Variation des humidités relatives entre Kiboko et Weru



Répartition des pluies à Kiboko et à Weru



## Annexe 2 :

### Tableau de contingence

		OBSERVATIONS		
		OUI	NON	TOTAL
PREDICTIONS	OUI	BON	Fausse Alarms	Prédiction O
	NON	OUBLIS	Corrects Négatifs	Prédiction N
	TOTAL	OBSERVATION OUI	OBSERVATION NON	TOTAL

Transformation de l'information quantitative (date de semis re-semis) en information qualitative (précocité, ...)

Date observée	Date Sarrah	Date observée2	Date Sarrah3
120	181	Précoce	Tardive
123	122	Précoce	Précoce
169	200	Intermédiaire	Tardive
183	200	Tardive	Tardive
195	200	Tardive	Tardive
168	167	Intermédiaire	Intermédiaire
166	165	Intermédiaire	Intermédiaire
156	156	Intermédiaire	Intermédiaire
123	123	Précoce	Précoce
140	140	Précoce	Précoce
182	181	Tardive	Tardive
212	214	Tardive	Tardive
156	155	Intermédiaire	Intermédiaire
152	152	Intermédiaire	Intermédiaire
183	194	Tardive	Tardive
195	194	Tardive	Tardive

$$\text{Score de réussite ou de bonnes prévisions : Réussi} = \frac{\text{Bons} + \text{négatifs corrects}}{\text{Total}}$$



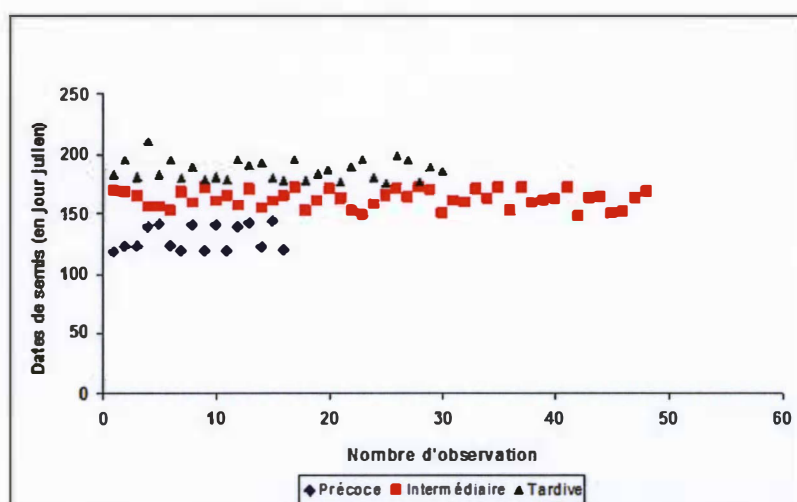
Score de réussite de Heidke :

$$H = [((\text{Bons} + \text{Négatifs corrects}) - (\text{Constante}) \text{hasard}) / N - (\text{Constante}) \text{hasard}]$$





**Annexe 3 :** Classification des dates de semis observées en stratégie de semis précoce, intermédiaire et tardive



## RESUME

Les travaux effectués lors du stage peuvent se définir en deux objectifs : i) l'étude des effets d'un transect altitudinal sur la croissance et le développement des variétés locales de sorgho au Kenya ainsi que leur caractérisation, ii) l'analyse des pratiques de semis, culture du mil dans la région de Niamey confrontées à la diversité des situations, climat, variétés et sol, afin de spécifier des stratégies de semis des paysans. Dans ces deux cas les travaux ont permis d'améliorer le paramétrage et d'estimer la capacité prédictives du modèle de culture SARRA-H sur des essais en milieu contrôlés et ou des enquêtes en milieu paysan. Ce modèle étant utilisé dans le cadre d'étude des impacts climatiques sur le rendement des céréales.

A partir des données d'essais agronomiques du projet PIVREVAT en milieu contrôlé, implantées sur deux sites au Kenya le long d'un gradient altitudinal (Kiboko, 950m d'altitude et Weru, 1160 m d'altitude), nous avons analysé les spécificités de 5 variétés locales de sorgho en vue d'améliorer les paramètres du modèle SARRA-H sur ces variétés et de vérifier la robustesse de la relation de répartition de biomasse utilisée dans le modèle. Les résultats mettent en évidence : (i) que les variétés étudiées ont deux types très différents de réponse à la date de semis et que les durées de cycle varient d'un site à l'autre ; (ii) le modèle rend en particulier assez bien compte les phases et cycles de développement de ces variétés paysannes pendant les périodes de semis ; (iii) la relation allométrique entre le ratio « biomasse feuille / biomasse aérienne » en fonction de biomasse aérienne est la même pour les variétés du même groupe.

A partir des données d'enquêtes et de suivis menés en milieu paysan sur la culture du mil, pour 7 années consécutives (2004 à 2010) et des enregistrements pluviométriques journaliers sur le degré carré de Niamey, une analyse de la performance du modèle et de sa capacité à reproduire les dates de semis et re-semis observées en milieu paysan a été réalisée. Les résultats montrent que (i) les performances du modèle SARRA-H pour simuler les dates de semis et re-semis sont acceptables au vue de la complexité de la relation entre la date de début de la saison des pluies et les stratégies de semis en milieu paysan ; (ii) le modèle SARRA-H simule assez correctement la variabilité interannuelle des dates de semis, mais il simule passablement la variabilité dans l'espace lorsque le début de la saison des pluies est précoce

**MOTS-CLÉS :** Date de semis et re-semis, Mil, Relation Allométrique, SARRA-H, Sorgho

## ABSTRACT

Work aims to define two problematic: i) document the specificities of five local's Sorghum varieties on Eastern slope of Mount Kenya and analyse the effect of altitudinal transect on their development, ii) analyse the pearl Millet sowing practices in the area of Niamey in Niger versus the environmental variability and constraint (climate, crop varieties and soil) to specify farmer's sowing strategies. Those two studies allow optimising the use and parameterisation of the SARRA-H crop model and specifying his predictive capacity using trials and farmer's survey data. The SARRA-H model is mainly use in the context of the impact of climate variability and change on cereals yield prediction in prospective studies and for food security (early warning system).

Using trials data over two sites along the Eastern slope of Mount Kenya, Kiboko at 950 m and Weru at 1160 m (PICREVAT, project), we have documented the specificities of five local's Sorghum varieties aim optimizing the parameterisation of SARRA-H crop model and also verifying the robustness of allometric repartition concept implemented in the software. Results show: (i) varieties have two types of process governing their development when changing date of sowing and as expected the length of cycle vary from site to site; (ii) the simulations of phase's duration over the common sowing periods are acceptable; (iii) the allometric relationship is robust between varieties group but unluckily not along the altitudinal transect.

Using farmer's survey data on pearl millet cropping system, during seven consecutive years (from 2004 to 2010) and rainfall data over the scare degree of Niamey, we analyse the predictive capacity of SARRA-H model simulating sowing date and failure sowing. Results show: (i) the predictive capacity is satisfactory face on the complexity of farmer's strategies mitigating the variability of the onset rainy season; (i) the SARRA-H model simulate accurately the inter-annual variability of sowing date but less satisfying for the spatial variability in case of very early rainy season.

**KEYWORDS:** Allometric relationship, Millet, Sorghum, Sowing and re-sowing date